

刘诗序,王智煜,阎 昊,等. 不同 ATIS 市场占有率下的逐日路径选择机理[J]. 长安大学学报(自然科学版),2022,42(4):118-126.
LIU Shi-xu,WANG Zhi-yu,YAN Hao,et al. Mechanism of day-to-day route choice under different ATIS market penetration[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2022,42(4):118-126.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.04.012

不同 ATIS 市场占有率下的逐日路径选择机理

刘诗序¹,王智煜²,阎 昊³,朱建超¹,王叔雨¹

(1. 福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108; 2. 福州轨道交通设计院有限公司,
福建 福州 350004; 3. 山西工商学院,山西 太原 030036)

摘 要:为探究不同先进的出行者信息系统(ATIS)市场占有率下的出行者逐日路径选择机理,借助行为试验方法,设计 5 组具有代表性的不同 ATIS 市场占有率下出行者逐日路径选择行为试验,ATIS 市场占有率依次为 0%、25%、50%、75%和 100%,根据构造的路径选择决策变量可能出现的 4 种情形,将其记为 4 个特征变量并分类统计,采用“K-Means++”理论建模并进行聚类探讨其路径选择机理。研究表明:随着试验轮数的增加,Braess 路网的 3 条路径历史行程时间持续波动,并且随着 ATIS 市场占有率的增大而逐步趋于用户均衡;路径切换次数呈现波动状态并贯穿试验全程;当 ATIS 市场占有率为 0%时,路径切换次数显著高于其他 ATIS 市场占有率(25%、50%、75%、100%);当出行路网存在一定的 ATIS 市场占有率时,路径切换次数仅在 ATIS 市场占有率为 50%和 75%之间存在较小差异;出行者在逐日路径选择过程中,总体上存在 4 种路径选择模式,直接响应、逆向响应、始终保持路径选择、始终切换路径选择;不同 ATIS 市场占有率下,出行者的路径选择模式不尽相同;随着 ATIS 市场占有率逐渐增大,出行者群体之间的路径选择模式差异程度逐渐增大,出行者的个体异质也逐渐增大;出行者在完全路网信息条件下对行程时间变化的敏感性比在不完全路网信息条件下差。

关键词:交通工程;路径选择机理;聚类分析;ATIS 市场占有率;行为试验

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2022)04-0118-09

Mechanism of day-to-day route choice under different ATIS market penetration

LIU Shi-xu¹, WANG Zhi-yu², YAN Hao³, ZHU Jian-Chao¹, WANG Shu-yu¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;
2. Fuzhou Rail Transit Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, Fujian, China;
3. Shanxi Technology and Business College, Taiyuan 030036, Shanxi, China)

Abstract: To explore the mechanism of travelers' day-to-day route choice under different advanced traveler information systems (ATIS) market share, with the help of behavioral experiment, five representative day-to-day route-choice behavior experiments were designed for travelers under different ATIS market penetration (0%, 25%, 50%, 75% and 100%). According to the four

possible scenarios of constructed route choice decision variables, they were recorded as four characteristic variables and the travelers were classified. The K-Means++ clustering model was used to analyze the route choice mechanism. The results show that with the increase of experimental rounds, the historical travel times of three routes of the Braess network fluctuate continuously. With the increase of ATIS market penetration, the travel times gradually tend to user equilibrium and the number of route switching fluctuates through the whole experiment. When the ATIS market penetration is 0%, the number of route switching is significantly higher than that of other ATIS market penetration (25%, 50%, 75%, 100%). When the network has a certain ATIS market penetration, the number of route switching is only a small difference between the ATIS market penetration of 50% and 75%. Four kinds of route choice patterns are found in traveler's day-to-day route choice, direct response, reverse response, always maintaining route choice, and always switching route choice. Under different ATIS market penetration, the route choice modes are not the same. With the increase of ATIS market penetration, the difference degree of route choice mode between groups of travelers gradually increases, and the individual heterogeneity of travelers is also gradually increasing. The sensitivity of travelers to the change of travel time under the condition of complete network information is worse than that under the condition of incomplete network information. 5 tabs, 3 figs, 27 refs.

Key words: traffic engineering; route choice mechanism; cluster analysis; ATIS market penetration; behavioral experiment

0 引言

先进的出行者信息系统(advanced traveler information systems, ATIS)为出行者提供各种出行信息服务,包括出行前、出行中和出行后的交通信息,同时也提供出行决策优化方案,因此,ATIS会影响出行者的出行选择行为。国内外不少学者借助行为试验方法,探究基于不同类型出行信息下出行者的路径选择行为规律。在信息发布的准确性方面,早期学者 Iida 等率先采用行为试验,探究行程时间信息对出行者路径选择的影响,发现路网流量持续波动,同时揭示了出行者在反复路径选择时存在积累“出行经验”的现象^[1]。随后,Iida 等还探讨了信息质量对出行选择行为的影响,发现信息质量的降低,会影响出行者参考该信息的意愿^[2]。Liu 等发现信息可靠性以及信息延误均会对出行决策产生不同程度的影响^[3]。Clarke 等运用统计方法探究信息趋势对出行者路径选择行为的影响规律^[4]。Ben-elia 等分析信息发布准确性对出行者路径决策行为的影响,通过设置 3 种组合情景(安全-快速、风险-快速、较慢-风险)来分别代表不同的出行时间范围,探究被试者选择快速路的比例,发现出行信息对出行时间分布的影响是正向的^[5]。随后,Ben-elia 等又通过设置规定性、描述性以及经验性反馈信息,

探究信息准确性对路径选择的影响,发现规定性信息比描述性、试验性反馈信息具有更大的影响,并且信息准确性的降低会影响路径选择行为^[6]。Moghadda 等研究发现,出行目的、信息准确性以及收益都是影响被试者做出路径选择判断的重要因素^[7]。

在信息发布的形式方面,刘天亮等通过构建社交渠道,探究信息交互率对路网状态的影响,发现随着信息交互率的逐渐增大,路网状态由最初的系统最优,逐渐趋于用户均衡^[8]。Zhang 等通过改变被试者人数,探讨社交圈的信息交互对试验路网的整体影响以及个体影响^[9]。Saedi 等随机选取 150 位被试者开展行为试验,发现信息的复杂性、数量和类型均会影响被试者对路径选择的认知行为^[10]。

在信息发布的内容方面,通过改变信息发布内容的试验边界条件来探究出行者路径选择行为,总体上划分为 3 大类:有无提供完全路网信息、实时出行信息、预测行程时间信息。为探究有无提供被试者完全路网信息对路径选择行为的影响,国内外诸多学者对其展开较为深入的研究。Bogers 等通过设计 2 种不同信息的试验场景,发现提供所有历史出行时间能降低该出行者的行程时间^[11]。Wang 等研究发现,受得知历史行程时间信息的影响,被试者降低了自身的选择惯性行为,同时发现当被试者充

分了解或缺乏试验路网的完整行程时间信息时,倾向选择的路径存在差异^[12]。为揭示有无提供实时出行信息对出行者路径选择行为的影响,Shiftan 等通过行为试验来获取被试者路径选择数据,发现当被试者追求风险收益时,其更偏好于选择出行时间较短但标准差较大的路径^[13]。Lu 等通过设置随机降低路径容量的试验边界条件,用以考察实时信息的作用,发现提供实时信息有助于降低路网的行程时间,而提供未选择路径的实时信息则起到相反的作用^[14]。随后, Lu 等又通过设置有无提供被试者实时出行信息开展研究,发现实时出行信息能大幅度降低路网的不确定性,同时能辅助被试者更好了解当前路网状态^[15]。Mak 等通过设计 10 组交通行为试验,其中 5 组提供路段实时信息,另外 5 组则提供路径实时信息,探究告知出行者路段信息和路径信息对出行决策行为的影响^[16]。Yu 等通过节点告知被试者当前路径的实时状态,发现实时信息、选择惯性等均会对被试者路径选择行为产生影响^[17]。

为探究预测行程时间信息是如何影响路径选择行为的,尹子坤等设计有无提供预测行程时间信息作为试验边界条件,通过构造信息偏好系数,探究被试者信息偏好的演化规律,发现信息偏好系数总体上呈现出先波动,后逐渐趋于稳定状态^[18]。

当前研究中,借助行为试验对出行者路径选择机理的研究较少。Rapoport 等基于完全路网信息条件,观测收益情况与下轮路径选择结果,进行简单判定,将出行者路径选择模式划分为直接响应、逆向响应和固定模式^[19]。Selten 等通过 Yule 系数判定被试者路径选择模式,模式划分类似于 Rapoport 等结果^[19,20-22]。Meneguzzar 同样借助行为试验的研究方法,通过告知被试者完全和部分出行时间信息,探讨出行者的路径选择机理,发现在被试者个人平均行程时间方面,具有逆向选择思维的被试者比具有直接响应选择思维的低^[23]。Qi 等开展有无告知被试者完全路网信息情形的研究,通过聚类分析划分 4 类路径选择模式:直接响应、相反响应、高风险厌恶和维持现状,并对结果开展探讨^[24]。

综上,现有研究主要针对在有无告知完全路网信息的极端条件下,开展出行者路径选择机理的探究。但是,现实中路网不存在单一的完全或不完全信息条件,而是这 2 种信息以一定比例同时存在,即路网有一定的 ATIS 市场占有率。本文基于此,设计 5 组行为试验并建立与之相对应的最佳路径选择模型,但尚未对不同 ATIS 市场占有率下的出行者

路径选择机理展开研究^[25]。鉴于此,本文重点探讨不同 ATIS 市场占有率下的出行者路径选择机理。

1 试验设计

试验路网为 Braess 路网,含 5 条路段、3 条路径,如图 1 所示。为试验方便,路段阻抗函数均采用线性形式

$$t_{OA} = 2f_{OA} + 4 \quad (1)$$

$$t_{BD} = 2f_{BD} + 4 \quad (2)$$

$$t_{OB} = t_{AD} = 50 \quad (3)$$

$$t_{AB} = 10 \quad (4)$$

式中: f_{OA} 、 f_{BD} 为路段 OA、BD 的流量; t_{OA} 、 t_{BD} 、 t_{OB} 、 t_{AD} 、 t_{AB} 均为各个路段的行程时间。

因此,路径 OAD、OBD、OABD 的阻抗函数分别为

$$T_{OAD} = 2f_{OA} + 54 \quad (5)$$

$$T_{OBD} = 2f_{BD} + 54 \quad (6)$$

$$T_{OABD} = 2(f_{OA} + f_{BD}) + 18 \quad (7)$$

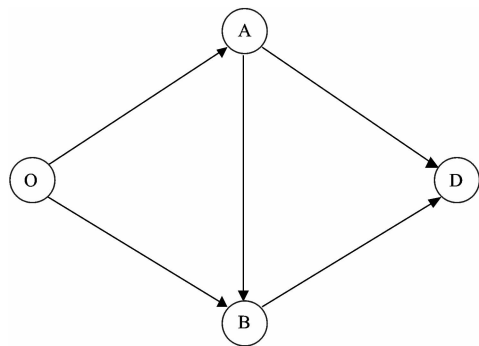


图 1 试验路网

Fig. 1 Experimental network

试验中,以告知完全路网信息的被试者比例来表示 ATIS 市场占有率,该部分被试者知晓 3 条路径的行程时间(即配备 ATIS),其余则告知不完全路网信息(即未配备 ATIS),只知道所选路径的行程时间。随机选取 100 位福州大学本科生作为被试者,设计 5 组具有不同 ATIS 市场占有率(0%、25%、50%、75%和 100%)的逐日路径选择行为试验,即每组 20 人,随机选取配备 ATIS 且符合比例的被试者人数,依次为 0、5、10、15 和 20 人。

每组试验均设计 32 轮路径选择,每轮代表 1 d(前 2 轮为预试验)。为提高被试者积极性以及数据的有效性,本试验设有奖励回报,每位被试者在完成每轮路径选择后,均会获得一定的收益 $P_i = 100 - T_{it}$,其中 T_{it} 表示被试者 i 在第 t 轮的行程时间。

依据试验设计参数可知:当选择路径 OABD、OAD 和 OBD 的被试者人数分别为 16、2 和 2 时,路网达到用户均衡(user equilibrium, UE),此时 3 条路径的行程时间均为 90 min;当选择路径 OABD、OAD 和 OBD 的被试者人数分别为 0、10 和 10 时,路网达到系统最优(system optimum, SO),此时 3 条路径的行程时间分别为 58、74 和 74 min。

试验实施流程:随机选择符合各组试验的 ATIS 市场占有率的被试者,告知其上轮试验中 3 条路径的行程时间信息;其他被试者,则告知其上轮试验自身所选路径的行程时间信息,以此来体现有无配备 ATIS 的信息发布作用。循环完成 32 轮路径选择并记录试验数据(前 2 轮不作记录)。试验完毕后,发放给每位被试者对应的收益奖励。需说明

的是试验的第 1 轮发布路径的自由流行程时间(路段的自由流时间之和)。

2 试验结果分析

当试验路网达到 UE 均衡时,3 条路径的行程时间均为 90 min,图 2 为 5 组试验 3 条路径的行程时间波动情况。由图 2 可知,5 组试验 3 条路径的历史行程时间持续波动并贯穿整个试验过程,并且随着试验轮数的增加,3 条路径的历史行程时间有收敛于用户均衡的趋势。对比发现,随着 ATIS 市场占有率的增大(第 I ~ V 组),路网平均行程时间越来越趋于用户均衡,表明 ATIS 市场占有率的增大,会加速路网趋于用户均衡,远离系统最优。

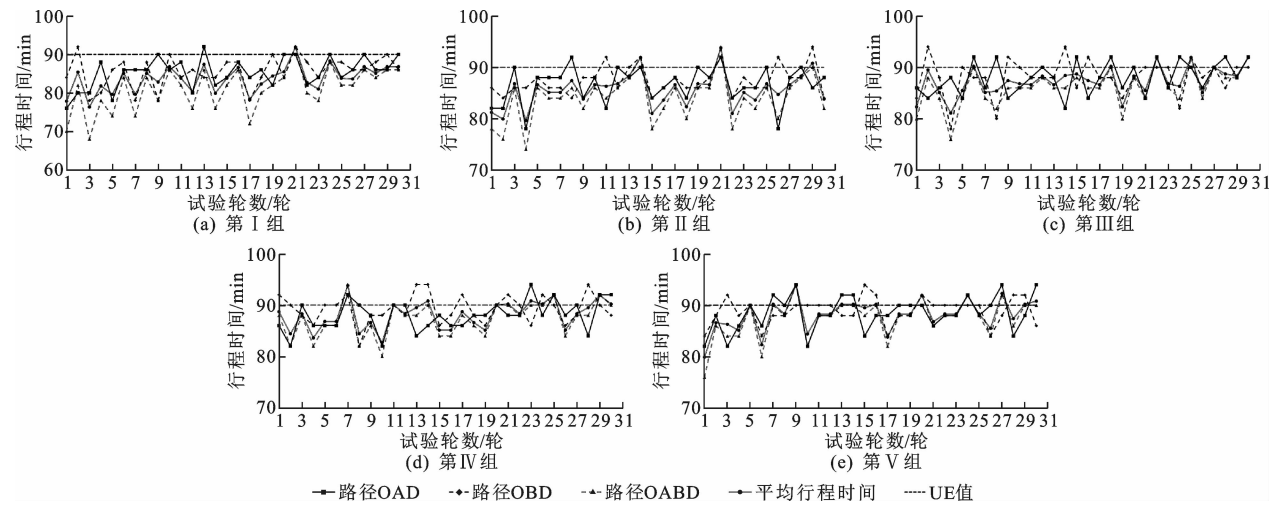


图 2 三条路径行程时间波动情况

Fig. 2 Travel time fluctuations of three routes

路径行程时间波动是由被试者路径切换造成的,为此,需进一步探究被试者路径切换规律。图 3 汇总了 5 组试验路径切换次数的波动情况,发现不同 ATIS 市场占有率下的路径切换存在差异,并采用 Wilcoxon 秩和检验定量判断这种差异性,检验结果如表 1 所示。

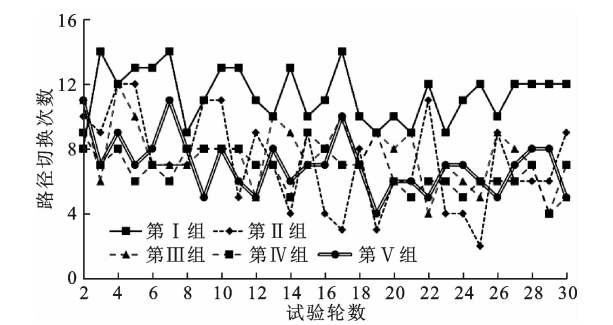


图 3 路径切换次数的波动情况

Fig. 3 Fluctuations of routes switching times

表 1 路径切换次数的 Wilcoxon 秩和检验

Tab. 1 Wilcoxon rank sum test of route switching times

试验组	第 I 组	第 II 组	第 III 组	第 IV 组	第 V 组
第 I 组		0.000 0***	0.000 0***	0.000 0***	0.000 0***
第 II 组	0.000 0***		0.447 4	0.727 9	0.934 8
第 III 组	0.000 0***	0.447 4		0.085 4*	0.190 0
第 IV 组	0.000 0***	0.727 9	0.085 4*		0.840 9
第 V 组	0.000 0***	0.934 8	0.190 0	0.840 9	

注:***表示显著水平 $p<0.01$; **表示显著水平 $p<0.05$; *表示显著水平 $p<0.1$ 。

由图 3 可知,5 组试验路径切换次数持续波动并贯穿整个试验过程,表明上轮历史行程时间的波动变化会影响被试者下轮路径选择。由表 1 可知,第 I 组(ATIS 市场占有率 0%)的路径切换次数明显高于其他 4 组试验且高度显著(显著水平 $p=0.000\ 0<0.01$),表明路网中被试者均未配备 ATIS

时,因被试者未获悉 ATIS 发布的完全路网信息,所以被试者通过不断的路径切换,以获得更多的路网行程时间变化趋势信息;另外,当路网中存在一定 ATIS 市场占有率时,除了第Ⅲ组和第Ⅳ组在路径切换次数上存在较小差异外($p=0.085\ 4<0.1$),其余试验组间均无明显的差异,这可能是由于被试者个体选择的差异性所致。

3 逐日路径选择机理探究

通过第 2 节的分析发现,无论是告知被试者完全路网信息,还是告知部分路网信息,均会影响被试者下一轮路径选择结果。为探究出行者逐日路径选择机理,本节采用 K-Means++ 聚类分析方法,通过统计特征变量揭示出行者逐日路径选择行为,并对聚类结果展开探讨。

3.1 路径选择决策变量构造

假设被试者 i 在第 t 轮路径选择时,考虑上轮所选路径的历史行程时间以及另外 2 条路径最近轮的最小历史行程时间,进而做出第 t 轮路径选择的结果,定义变量

$$\Delta_i^{(t)} = T_i^{(t-1),1} - \min\{T_i^{(l),2}, T_i^{(l),3}\} \tag{8}$$

$$\xi_i^{(t)} = \begin{cases} 0 & \text{保持上轮所选择的路径} \\ 1 & \text{切换上轮所选择的路径} \end{cases} \tag{9}$$

式中: $\Delta_i^{(t)}$ 表示被试者 i 在第 t 轮路径选择时,所考虑的历史行程时间差值; $T_i^{(t-1),1}$ 表示被试者 i 在第 $t-1$ 轮所选路径的历史行程时间; $T_i^{(l),2}$ 、 $T_i^{(l),3}$ 分别表示被试者 i 另外 2 条路径最近轮 l 的历史行程时间; $\xi_i^{(t)}$ 为二元变量,作为观测被试者 i 在第 t 轮是否切换路径选择的指标。

因 5 组试验具有不同 ATIS 市场占有率,针对式(8)作出如下说明:①当告知被试者 i 不完全路网信息时,即在第 t 轮路径选择时,只得知上轮(即第 $t-1$ 轮)所选路径的历史行程时间,另外 2 条路径最近轮的历史行程时间可能出现在 $t-2$ 、 $t-3$ 轮等,若另外 2 条路径被试者 i 在 $t-1$ 轮之前从未选择过,那么以该路径的自由流时间作为其最近轮的历史行程时间;②当告知被试者 i 完全路网信息时,即在第 t 轮路径选择时,既得知最近轮(即第 $t-1$ 轮)所选路径的历史行程时间,又得知另外 2 条路径的历史行程时间。因此,完全路网信息时最近轮的历史行程时间即为上一轮的历史行程时间。

通过上述分析可知,每位被试者在路径选择时均存在路径选择决策变量组合情况中的一种,并且以一定的概率发生。本文基于 $\Delta_i^{(t)}$ 和 $\xi_i^{(t)}$ 可能出现

的取值情况,对 4 类组合情况进行条件概率统计,并将 4 类情况发生的概率记为特征变量 $x_i^{(1)}$ 、 $x_i^{(2)}$ 、 $x_i^{(3)}$ 和 $x_i^{(4)}$,表 2 为组合的 4 种情况,表 3 为一般情况下以 4 个特征变量定义的路径选择模式。

表 2 路径选择决策变量 $[\Delta_i^{(t)}, \xi_i^{(t)}]$ 组合情况

Tab. 2 Route choice decision variable $[\Delta_i^{(t)}, \xi_i^{(t)}]$

combination		
$\Delta_i^{(t)}$ 值	第 t 轮路径选择结果	条件概率
$\Delta_i^{(t)} \leq 0$	$\xi_i^{(t)} = 0$	$x_i^{(1)} = P(\xi_i^{(t)} = 0 \Delta_i^{(t)} \leq 0)$
	$\xi_i^{(t)} = 1$	$x_i^{(2)} = P(\xi_i^{(t)} = 1 \Delta_i^{(t)} \leq 0)$
$\Delta_i^{(t)} > 0$	$\xi_i^{(t)} = 0$	$x_i^{(3)} = P(\xi_i^{(t)} = 0 \Delta_i^{(t)} > 0)$
	$\xi_i^{(t)} = 1$	$x_i^{(4)} = P(\xi_i^{(t)} = 1 \Delta_i^{(t)} > 0)$

注:式中: $P(\cdot)$ 为概率函数。

表 3 一般情况下的路径选择模式识别

Tab. 3 Pattern recognition of route choice in general

序号	条件概率组合比较	路径选择模式识别
1	$x_i^{(1)} + x_i^{(4)} > \max\{x_i^{(2)} + x_i^{(3)}, x_i^{(1)} + x_i^{(3)}, x_i^{(2)} + x_i^{(4)}\}$	直接响应
2	$x_i^{(2)} + x_i^{(3)} > \max\{x_i^{(1)} + x_i^{(4)}, x_i^{(1)} + x_i^{(3)}, x_i^{(2)} + x_i^{(4)}\}$	逆向响应
3	$x_i^{(1)} + x_i^{(3)} > \max\{x_i^{(1)} + x_i^{(4)}, x_i^{(2)} + x_i^{(3)}, x_i^{(2)} + x_i^{(4)}\}$	始终保持路径选择
4	$x_i^{(2)} + x_i^{(4)} > \max\{x_i^{(1)} + x_i^{(4)}, x_i^{(2)} + x_i^{(3)}, x_i^{(3)} + x_i^{(1)} + x_i^{(3)}\}$	始终切换路径选择

当只捕获到被试者 i 在 $\Delta_i^{(t)} \leq 0$ 或 $\Delta_i^{(t)} > 0$ 的特殊情况时,根据单一的条件概率进行推断;当只成功捕获到被试者 i 在 $\Delta_i^{(t)} \leq 0$ 的特殊情况时,若 $x_i^{(1)} \geq x_i^{(2)}$ 时,则认定该模式为直接响应,否则认定为逆向响应;当只成功捕获到被试者 i 在 $\Delta_i^{(t)} > 0$ 的特殊情况时,若 $x_i^{(3)} \geq x_i^{(4)}$ 时,则认定该模式为逆向响应,否则认定为直接响应。

3.2 K-Means++ 理论建模

通过第 3.1 节的分析可知,每位被试者在做出路径决策时,均存在路径选择的 4 个特征变量($x_i^{(1)}$ 、 $x_i^{(2)}$ 、 $x_i^{(3)}$ 和 $x_i^{(4)}$),由于机器学习可以进行模式识别,因此本文采用机器学习方法训练 5 组试验中每位被试者的路径选择特征变量,可以识别出行者路径选择模式。K-Means++ 聚类算法是一种典型的基于相似性的无监督式学习算法,并且是基于 K-Means 随机初始化聚类中心的一种改进优化算法^[26],通过比较样本数据之间的相似性,以判定相似样本数据的划分簇类,具体建模步骤如下。

步骤 1:由于 20 位被试者在做出路径决策时,均存在 4 个特征变量($x_i^{(1)}$ 、 $x_i^{(2)}$ 、 $x_i^{(3)}$ 和 $x_i^{(4)}$),并将其记为 X_i 。为此,假设任一试验组的训练数据集为 X

$$\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_{20}]^T = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & x_1^{(3)} & x_1^{(4)} \\ x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & x_2^{(3)} & x_2^{(4)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{20}^{(1)} & x_{20}^{(2)} & x_{20}^{(3)} & x_{20}^{(4)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

步骤2:第0次迭代时,随机选取 K 个聚类中心 $\{C_k^{[0]}\}$, $C_k^{[0]}$ 为第 k ($k=1, 2, \dots, K$) 个聚类中心,即

$$\{C_k^{[0]}\} = \{C_1^{[0]}, C_2^{[0]}, \dots, C_k^{[0]}, \dots, C_K^{[0]}\} \quad (11)$$

步骤3:为衡量每位被试者的特征变量 X_i 与第 t' 次迭代的聚类中心 $\{C_k^{[t']}\}$ 两者的相似程度,采用欧式距离 $d(X_i, C_k^{[t']})$ 作为衡量依据

$$d(X_i, C_k^{[t']}) = \|X_i - C_k^{[t']}\|^2 \quad (12)$$

$$\{C_k^{[t']}\} = \{C_1^{[t']}, C_2^{[t']}, \dots, C_k^{[t']}, \dots, C_K^{[t']}\} \quad (13)$$

步骤4:为最优划分特征变量 X_i 所属的簇类 $|C_k^{[t']}|$,即求解所有特征变量 X_i 与所属簇类 $|C_k^{[t']}|$ 的最小欧式距离。因此,定义第 t' 次迭代时,对应的 K-Means++ 目标函数 $J(d, \{C_k^{[t']}\})$ 如下

$$J(d, \{C_k^{[t']}\}) = \min \left(\sum_{i=1}^{20} \sum_{k=1}^K \delta_{ik}^{[t']} d(X_i, C_k^{[t']}) \right) = \min \left(\sum_{i=1}^{20} \sum_{k=1}^K \delta_{ik}^{[t']} \|X_i - C_k^{[t']}\|^2 \right) \quad (14)$$

$$\delta_{ik}^{[t']} = \begin{cases} 1 & X_i \in C_k^{[t']} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\delta_{ik}^{[t']}$ 为二元变量。

此时,经第 t' 次迭代, X_i 已划分至对应的簇类 $|C_k^{[t']}|$ 中。

步骤5:完成步骤4的特征变量所属簇类划分后,接着更新下一次迭代的聚类中心。即第 $t+1$ 次迭代时,所对应的聚类中心 $\{C_k^{[t+1]}\}$ 如下

$$C_k^{[t+1]} = \arg \min \left(\sum_{X_i \in |C_k^{[t]}|} \|X_i - C_k^{[t+1]}\|^2 \right) \quad (16)$$

$$\{C_k^{[t+1]}\} = \{C_1^{[t+1]}, C_2^{[t+1]}, \dots, C_k^{[t+1]}, \dots, C_K^{[t+1]}\} \quad (17)$$

步骤6:重复步骤3、4、5。直到第 $t'+1$ 次迭代的聚类中心 $\{C_k^{[t+1]}\}$ 与第 t' 次迭代的聚类中心 $\{C_k^{[t']}\}$ 保持不变时,迭代终止,即 $\{C_k^{[t+1]}\} = \{C_k^{[t']}\}$ 。

3.3 聚类结果分析

采用 Rousseeuw 提出的平均轮廓系数 (mean silhouette coefficient) 来判定每组试验的最佳聚类数 $K^{[27]}$,借助 Python 软件的 Scikit-Learn 模块进行 K-Means++ 理论建模的算法求解。表4为5组试验路径选择模式识别的聚类结果。

由表4可知,首先,总体上:①五组试验,共100位被试者,呈现出4种路径选择模式,反映被试者群体存在一定程度的群体差异性;②五组试验最佳聚类数 K 分别为2、2、3、3和3,表明随着 ATIS 市场占有率的增大,被试者群体之间的差异程度逐渐增大。

其次,对4种路径选择模式展开讨论。

(1)直接响应。捕获到该模式的试验组分别是第 I、II、V 组,分别占 90%、80%、30%,符合该模式的被试者对行程时间差值 $\Delta_i^{(t)}$ 具有一定程度的敏感性,对行程时间的波动变化能做出迅速响应,但随着 ATIS 市场占有率的增大,该模式出现的概率逐渐降低;当 ATIS 市场占有率为 0% 时,被试者对收益为负 (即 $\Delta_i^{(t)} > 0$) 具有更高程度的敏感性 (第 I 组 $x_i^{(4)} = 0.7697 > x_i^{(1)} = 0.5192$),但随着 ATIS 市场占有率的增大,反而逐渐对收益为正 ($\Delta_i^{(t)} \leq 0$) 更具敏感性 (第 II 组 $x_i^{(1)} = 0.7290 > x_i^{(4)} = 0.5550$; 第 V 组 $x_i^{(1)} = 0.8169 > x_i^{(4)} = 0.5293$)。

(2)逆向响应。捕获到该模式的试验组分别是第 II、III、IV 组,分别占 20%、10%、10%,与直接响应相似,同样对 $\Delta_i^{(t)}$ 具有一定程度的敏感性并且对行程时间的波动变化能迅速做出具有前瞻性的响应 (第 II 组 $x_i^{(3)} = 0.9397 > x_i^{(4)} = 0.0603$; 第 III 组 $x_i^{(3)} = 0.9310 > x_i^{(4)} = 0.0690$; 第 IV 组 $x_i^{(3)} = 0.9310 > x_i^{(4)} = 0.0690$),但符合该类模式的被试者只占群体的较少部分;另一方面,该模式仅在非单一信息发布下才被捕获识别到 (第 II 组 ATIS 市场占有率 25%、第 III 组 50%、第 IV 组 75%),并且随着 ATIS 市场占有率的逐渐增大,该模式出现的概率呈现逐渐降低的趋势。

(3)始终保持路径选择。捕获到该模式的试验组分别是第 I、III、IV、V 组,分别占 10%、50%、40%、40%,符合该模式的被试者对行程时间差值 $\Delta_i^{(t)}$ 的敏感性较差,尽管 $\Delta_i^{(t)}$ 随着试验轮数不断发生变化,这类被试者似乎对某条路径具有独特的选择性偏好,表现出维持现状的路径选择态度,他们在做出路径切换行为时,往往考虑的是当前试验轮数是否达到需要切换路径的条件,而不是因为 $\Delta_i^{(t)}$ 的变化而做出路径切换行为 (第 I 组 $x_i^{(1)} = 0.4375 > x_i^{(2)} = 0.0625$, $x_i^{(3)} = 0.7537 > x_i^{(4)} = 0.2463$; 第 III 组 $x_i^{(1)} = 0.8362 > x_i^{(2)} = 0.1638$, $x_i^{(3)} = 0.6942 > x_i^{(4)} = 0.3058$; 第 IV 组 $x_i^{(1)} = 0.8623 > x_i^{(2)} = 0.1377$, $x_i^{(3)} = 0.7646 > x_i^{(4)} = 0.2354$; 第 V 组 $x_i^{(1)} = 0.9665 > x_i^{(2)} = 0.0335$, $x_i^{(3)} = 0.9269 > x_i^{(4)} = 0.0731$)。

表 4 路径选择模式识别的聚类结果

Tab. 4 Clustering results of route choice pattern recognition

序号		路径选择 模式识别	被试者人数	比例/%	条件概率均值(标准差)			
					$x_i^{(1)}$	$x_i^{(2)}$	$x_i^{(3)}$	$x_i^{(4)}$
第Ⅰ组	1	直接响应	18	90	0.519 2 (0.175 4)	0.480 8 (0.175 4)	0.230 3 (0.101 2)	0.769 7 (0.101 2)
	2	始终保持路径 选择	2	10	0.437 5 (0.437 5)	0.062 5 (0.062 5)	0.753 7 (0.039 4)	0.246 3 (0.039 4)
第Ⅱ组	1	直接响应	16	80	0.729 0 (0.146 4)	0.271 0 (0.146 4)	0.445 0 (0.185 1)	0.555 0 (0.185 1)
	2	逆向响应	4	20	0.000 0 (0.000 0)	0.000 0 (0.000 0)	0.939 7 (0.037 6)	0.060 3 (0.037 6)
第Ⅲ组	1	始终保持路径 选择	10	50	0.836 2 (0.106 5)	0.163 8 (0.106 5)	0.694 2 (0.137 9)	0.305 8 (0.137 9)
	2	始终切换路径 选择	8	40	0.453 8 (0.147 6)	0.546 2 (0.147 6)	0.312 2 (0.168 2)	0.687 8 (0.168 2)
	3	逆向响应	2	10	0.000 0 (0.000 0)	0.000 0 (0.000 0)	0.931 0 (0.069 0)	0.069 0 (0.069 0)
第Ⅳ组	1	始终保持路径 选择	10	50	0.862 3 (0.128 0)	0.137 7 (0.128 0)	0.764 6 (0.162 7)	0.235 4 (0.162 7)
	2	始终切换路径 选择	8	40	0.387 6 (0.174 7)	0.612 4 (0.174 7)	0.389 5 (0.172 8)	0.610 5 (0.172 8)
	3	逆向响应	2	10	0.000 0 (0.000 0)	0.000 0 (0.000 0)	0.931 0 (0.000 0)	0.069 0 (0.000 0)
第Ⅴ组	1	始终保持路径 选择	8	40	0.966 5 (0.049 1)	0.033 5 (0.049 1)	0.926 9 (0.069 6)	0.073 1 (0.069 6)
	2	始终切换路径 选择	6	30	0.284 6 (0.067 9)	0.715 4 (0.067 9)	0.264 2 (0.093 2)	0.735 8 (0.093 2)
	3	直接响应	6	30	0.816 9 (0.114 8)	0.183 1 (0.114 8)	0.470 7 (0.090 9)	0.529 3 (0.090 9)

(4)始终切换路径选择。捕获到该模式的试验组分别是第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ组,分别占40%、40%、30%,与始终保持路径选择相似,同样对 $\Delta_i^{(v)}$ 的敏感性较差,但相反的是,这类被试者似乎对现有路网的3条路径都不太满意,没有所谓的选择性偏好,表现出保持始终切换路径的选择态度(第Ⅲ组 $x_i^{(2)}=0.546\ 2>x_i^{(1)}=0.453\ 8,x_i^{(4)}=0.687\ 8>x_i^{(3)}=0.312\ 2$;第Ⅳ组 $x_i^{(2)}=0.612\ 4>x_i^{(1)}=0.387\ 6,x_i^{(4)}=0.610\ 5>x_i^{(3)}=0.389\ 5$;第Ⅴ组 $x_i^{(2)}=0.715\ 4>x_i^{(1)}=0.284\ 6,x_i^{(4)}=0.735\ 8>x_i^{(3)}=0.264\ 2$)。

最后,为进一步探究完全或不完全路网信息对被试者路径选择的影响,表5汇总了2种信息发布下5组试验(共100位被试者)路径选择机理模式的分布比例。

由表5可知:①在告知被试者不完全路网信息的条件下,被试者更容易对行程时间信息的变化做出相应的路径选择((58%+16%)>(22%+0%));

表 5 不同信息发布下的路径选择模式的分布比例

Tab. 5 Distribution proportions of route choice patterns under different information release

信息发布	路径选择模式			
	直接响应	逆向响应	始终保持 路径选择	始终切换 路径选择
不完全路网信息	58	16	18	8
完全路网信息	22	0	42	36

②在告知被试者完全路网信息的条件下,被试者对路网行程时间的波动变化的敏感性较差((42%+36%)>(18%+8%));③对于逆向响应模式,在发布完全路网信息的条件下并未捕获到符合该模式的被试者,表明信息完整性会降低被试者在路径选择时采取逆向思维的判断。

4 结 语

(1)出行者在路径选择时总体上存在4种路径

选择模式(直接响应、逆向响应、始终保持路径选择和始终切换路径选择模式)。基于不同 ATIS 市场占有率,所捕获到同类型的路径选择模式存在差异。不同 ATIS 市场占有率下,有无配备 ATIS 两类被试者路径选择模式的分布比例也存在一定程度的差异。

(2)随着 ATIS 市场占有率的增大,被试者差异程度逐渐增大,体现不同信息发布对出行者路径选择模式的影响。

(3)为进一步检验不同 ATIS 市场占有率对出行者逐日路径选择机理的影响规律,在今后的研究中需采集符合试验场景的大量出行数据,对4种路径选择模式展开实证研究。

参考文献:

References:

- [1] IIDA Y, AKIYAMA T, UCHIDA T. Experimental analysis of dynamic route choice behavior[J]. Transportation Research Part B, 1992, 26(1): 17-32.
- [2] IIDA Y, UNO N, YAMADA T. Experimental analysis approach to analyze dynamic route choice behavior of driver with travel time information[C]//IEEE. Proceedings of VNIS'94—1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference. New York: IEEE, 1994: 377-382.
- [3] LIU Y H, MAHMASSANI H S. Dynamic aspects of commuter decisions under advanced traveler information systems: Modeling framework and experimental results[J]. Transportation Research Record, 1998 (1645): 111-119.
- [4] CLARKE D D, WARD P, BARTLE C, et al. An analysis of effects of trend information upon route choice behaviour by in-laboratory experiment[J]. International Journal of ITS Research, 2008, 6(1): 57-65.
- [5] BEN-ELIA E, EREV I, SHIFTAN Y. The combined effect of information and experience on drivers' route-choice behavior[J]. Transportation, 2008, 35(2): 165-177.
- [6] BEN-ELIA E, DI PACE R, BIFULCO G N, et al. The impact of travel information's accuracy on route-choice[J]. Transportation Research Part C, 2013, 26: 146-159.
- [7] MOGHADDAM Z R, JEIHANI M, PEETA S, et al. Comprehending the roles of traveler perception of travel time reliability on route choice behavior[J]. Travel Behaviour and Society, 2019, 16: 13-22.
- [8] 刘天亮,张冲,王天歌,等.朋友圈信息交互对个体出行决策行为的影响研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(6): 86-93.
LIU Tian-liang, ZHANG Chong, WANG Tian-ge, et al. Effects of friends' information interaction on travel decisions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(6): 86-93.
- [9] ZHANG C, LIU T L, HUANG H J, et al. A cumulative prospect theory approach to commuters' day-to-day route-choice modeling with friends' travel information[J]. Transportation Research Part C, 2018, 86: 527-548.
- [10] SAEDI R, KHADEMI N. Travel time cognition: Exploring the impacts of travel information provision strategies[J]. Travel Behaviour and Society, 2019, 14: 92-106.
- [11] BOGERS E A I, VITI F, HOOGENDOORN S P. Joint modeling of advanced travel information service, habit, and learning impacts on route choice by laboratory simulator experiments[J]. Transportation Research Record, 2005(1926): 189-197.
- [12] WANG J H, RAKHA H. Empirical study of effect of dynamic travel time information on driver route choice behavior[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3257.
- [13] SHIFTAN Y, BEKHOR S, ALBERT G. Route choice behaviour with pre-trip travel time information[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2011, 5(3): 183-189.
- [14] LU X, GAO S, BEN-ELIA E. Information impacts on route choice and learning behavior in a congested network[J]. Transportation Research Record, 2011 (2243): 89-98.
- [15] LU X, GAO S, BEN-ELIA E, et al. Travelers' day-to-day route choice behavior with real-time information in a congested risky network[J]. Mathematical Population Studies, 2014, 21(4): 205-219.
- [16] MAK V, GISCHES E J, RAPOPORT A. Route vs. segment: An experiment on real-time travel information in congestible networks[J]. Production and Operations Management, 2015, 24(6): 947-960.
- [17] YU X L, GAO S. Learning routing policies in a disrupted, congestible network with real-time information: An experimental approach[J]. Transportation Research Part C, 2019, 106: 205-219.
- [18] 尹子坤,关宏志,李涛.逐日路径演化中出行者信息偏好的实验分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(4): 234-240.
YIN Zi-kun, GUAN Hong-zhi, LI Tao. Experimental

analysis of diver’s information preference under day-to-day traffic dynamics[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017,17(4):234-240.

[19] RAPOPORT A, MAK V, ZWICK R. Navigating congested networks with variable demand: Experimental evidence[J]. *Journal of Economic Psychology*, 2006, 27(5):648-666.

[20] SELTEN R, SCHRECKENBERG M, PITZ T, et al. Experimental investigation of day-to-day route choice behaviour [M]//SCHRECKENBERG M, SELTEN R. *Human Behaviour and Traffic Networks*. Heidelberg: Springer, 2003:325-330.

[21] SELTEN R, CHMURA T, PITZ T, et al. Commuters route choice behaviour[J]. *Games and Economic Behavior*, 2007, 58(2):394-406.

[22] CHMURA T, PITZ T, 费方域. 少数派博弈: 实验研究与模拟[J]. *系统管理学报*, 2007, 16(6):585-589. CHMURA T, PITZ T, FEI Fang-yu. The minority game: Experiments and simulations [J]. *Journal of Systems & Management*, 2007, 16(6):585-589.

[23] MENEGUZZER C. Contrarians do better: Testing participants’ response to information in a simulated day-to-day route choice experiment[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2019, 15:146-156.

[24] QI H, MA S F, JIA N, et al. Individual response modes to pre-trip information in congestible networks: Laboratory experiment [J]. *Transportmetrica A Transport Science*, 2019, 15(2):376-395.

[25] 刘诗序, 王智煜, 关宏志, 等. 不同信息下的逐日路径选择行为实验与模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(6):106-113, 144. LIU Shi-xu, WANG Zhi-yu, GUAN Hong-zhi, et al. Experiment and model of day-to-day route-choice behavior under different information [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(6):106-113, 144.

[26] 吴进宝. K-means 算法研究综述[J]. *电子技术与软件工程*, 2014(18):207. WU Jin-bao. A review of K-means algorithm [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2014 (18):207.

[27] ROUSSEUW P J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1987, 20:53-65.