

不确定环境下收费与信息对路径选择行为影响的实验研究

刘诗序¹, 王叔雨², 黄国良¹, 孙浩岩¹, 钟家承¹, 黄易丹¹

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建永福电力设计股份有限公司, 福建 福州 350108)

摘要: 在不确定环境下考虑信息发布与拥挤收费两种措施, 基于交通网络均衡, 推导了两路径简单路网的最优收费模型, 并推广至一般路网。基于两路径路网设计逐日路径选择行为实验, 分析了两种措施对路径选择行为的影响。结果表明: 完美信息与收费的实施均能减少流量波动, 单独实施收费的效果最佳, 但只有两种措施相结合时, 路网流量趋于用户均衡的趋势最稳定; 完美信息会增加路径切换行为, 而收费可有效抑制大幅的路径切换; 无收费时路径切换往往会造成出行成本增加, 而收费时则相反; 收费与信息结合时的出行时间比两种措施单独实施时小。

关键词: 不确定性路网; 行为实验; 最优拥挤收费; 出行信息; 交通均衡; 路径选择行为

中图分类号: U491

文献标志码: A

Experimental Study on Effect of Congestion Toll and Information on Route Choice Behavior in Uncertain Environment

LIU Shixu¹, WANG Shuyu², HUANG Guoliang¹, SUN Haoyan¹, ZHONG Jiacheng¹, HUANG Yidan¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Yongfu Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350108, China)

Abstract: Considering the two measures of information release and congestion charging under uncertain environment, and based on traffic network equilibrium, an optimal toll model of the simple two-route road network is derived and is extended to the general road network. Based on the two-route network, a day-to-day route choice behavior experiment is conducted. The impact of the two measures on travelers' route choice behavior is analyzed. The results show that the

implementation of perfect information and congestion charging can both reduce the flow fluctuation, and the effect of congestion charging alone is the best. However, only when the two measures are combined, the trend of road network flow towards user equilibrium is the most stable. Perfect information will increase route switching behavior, while congestion charging can effectively inhibit large route switching. When there is no congestion toll, route switching often increases the travel cost. On the contrary, when congestion toll is implemented, route switching can often reduce the travel cost. The travel time when the two measures of congestion tolling and traffic information release are implemented together is better than that when the two measures are implemented separately.

Keywords: uncertain road network; behavior experiment; optimal congestion toll; travel information; traffic equilibrium; route choice behavior

在交通系统中, 出行者、信息提供者和交通管理者三者相互影响; 出行者通过获取交通信息了解交通系统状态, 并结合交通政策, 调整出行行为; 信息提供者通过交通系统状态及相关政策来确定所需提供的信息; 交通管理者通过交通流量的时空分布变化规律以及出行信息来制定交通政策, 使交通系统效率最大化。先进的出行者信息系统(advanced traveler information systems, ATIS)是诸多城市普遍采取的一种出行信息提供方式, ATIS对出行行为的影响也逐渐引起了学者们的关注。基于行为实验方法, Iida等^[1]最早探究了信息精度对出行者使用信息意愿的影响; 针对信息的发布内容与发布形式, Tanaka等^[2]、Ben-Elia等^[3]、Meneguzzer^[4]分别研究了出行时间分布信息、描述性与

收稿日期: 2022-07-14

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(23YJCZH137)

第一作者: 刘诗序, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为交通规划与交通行为。

E-mail: 37815671@qq.com



论文
拓展
介绍

说明性信息、部分信息与完整信息如何影响出行者的路径选择;Imants等^[5]从多信息源角度探究了信息冲突、无关信息等对出行者路径选择行为的影响;Long等^[6]基于有限理性,探究了不同信息模式下出行者的切换行为与出行偏好。尹子坤等^[7]探索了出行者的路径选择行为与信息偏好的演化。

近年来,学者们逐渐把实际出行环境因素纳入到研究中。Lu等^[8]设计了事故因素,研究了出行前后不同信息组合如何影响路线选择行为;Rapoport等^[9]亦在事故环境下研究了出行前信息对路线选择的影响,并检验了Lindsey等^[10]提出的信息悖论;Yu等^[11]考虑由于天气恶劣、交通事故和道路临时封闭等原因造成各路径通行能力每天变化的情况下,出行前信息的作用。而ATIS这类技术可能存在问题,由于交通拥堵的外部性,信息的提供可能会带来反常效应:当ATIS市场占有率过高时,出行者都为避开拥堵路段,反而会导致不拥堵路段发生拥堵。然而,这一问题可通过同时实施拥挤收费的交通管理政策来避免。拥挤收费的思想最初是由Pigou^[12]提出的,而后Walters^[13]将边际成本定价理论运用到拥挤收费中,提出了第一最优道路拥挤收费;Yang^[14]融入“系统最优”与“最优收费”的概念,证明传统的边际成本定价理论在随机用户均衡的交通网络中同样适用;Smith^[15]考虑到路网系统存在约束,提出了仅对部分路段进行收费的第二最优道路拥挤收费。研究表明,由于交通拥堵造成的时间损失有一半以上是由车祸、恶劣天气等偶发性事件造成的^[16],Hall等^[17]研究了事故等不确定性因素影响下如何设置道路通行费,并发现道路收费降低了个人成本近10%。Kobayashi等^[18]设置了两个收费征收时刻,即告知出行前交通信息时以及所选路径交通状况得到确认后,探究了驾驶员福利水平与拥堵收费征收时刻的关系。YANG等^[19]考虑出行者的异质性,评估了信息(有无信息、收费信息)与拥堵定价的有效性。

拥挤收费理论的发展逐渐完善,为使理论应用于实践,也有学者探究了收费的可行性^[20]。近年来国内外学者也将行为实验的方法应用于评估和测试拥挤收费,Anderson等^[21]检验了最佳通行费的有效性;Hartman^[22]研究了通行费实施时被试者的响应;Gabuthy等^[23]基于瓶颈模型,研究了通行费水平如何影响出行者个人的路径选择,系统是否能达到稳定的均衡状态。从查阅到的文献可知,目前关于拥挤收费的行为实验研究较为匮乏,且现有关于拥挤收

费模型与出行信息的研究中,主要考虑确定性路网环境,而实际生活中驾驶人在出行中会受到各种不确定性因素的影响,如雨雪天气、交通事故、道路施工等,基于确定性路网环境的研究成果并不能很好地反映实际情况。基于此,本文考虑事故干扰的不确定路网环境,将拥挤收费与信息结合,建立不确定环境下交通网络发布不同信息时的拥挤收费模型,并设计出行路径选择行为实验,模拟出行者日常的出行路径选择,探究收费与信息对路径选择行为的影响,为有效缓解道路交通拥堵提供依据。

1 不确定环境下的最优收费模型

1.1 两路径路网

考虑一个单起讫点含两条平行路径的简单路网,如图1所示,两路径均有可能发生事故,设发生事故的率为 $P_i(0 \leq P_i \leq 1)$, x_i 表示路径 $i(i=1,2)$ 上的出行交通量, N 表示OD(起讫点)对间的总交通需求。实施最优收费政策时(记作“T”),各路径收费为 $\tau_i(\tau_i > 0)$,当不进行收费时(记作“NT”),此时 τ_i 为0。 T_1 表示系统总出行时间, C_i 表示路径 i 的出行成本,TC表示系统总出行成本。由于路径阻抗随着流量的增加而增加,为方便计算,本文的路径阻抗函数采取最简单直观的形式,即假设各路径阻抗(出行时间)为流量的线性增函数,令 t_{iG} 、 t_{iB} 分别表示路径 i 道路条件良好时和发生事故时的出行时间:

$$t_{iG}(x) = a_{iG} + b_{iG}x_i \quad (1)$$

$$t_{iB}(x) = a_{iB} + b_{iB}x_i \quad (2)$$

式中: a 为自由流时间; b 表示交通量每增加一个单位所增加的出行时间。

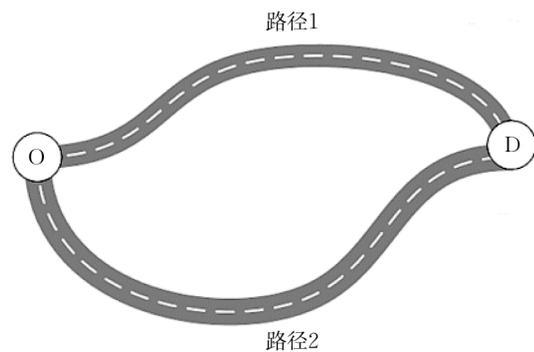


图1 两路径路网

Fig. 1 Two-route network

在信息发布内容上,考虑出行前的不完美信息条件(记作“imp”)与完美信息条件(记作“p”)。在不

完美信息条件下,出行者仅知晓各路径发生事故的
概率,以此信息为基础进行路径选择,此时路径*i*的
阻抗为式(3);在完美信息条件下,出行者通过ATIS
获知各路径的确切道路条件信息,在当前道路条件
下做出路径选择,此时路径*i*的阻抗为式(4)。

$$t_i^{imp}(x) = (a_{iG} + b_{iG}x_i)(1 - P_i) + (a_{iB} + b_{iB}x_i)P_i, \quad 0 < P_i < 1 \quad (3)$$

$$t_i^p(x) = (a_{iG} + b_{iG}x_i)(1 - P_i) + (a_{iB} + b_{iB}x_i)P_i, \quad P_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad (4)$$

式中: P_i 为路径*i*发生事故的概。

$$x_1^{UE,NT} = \frac{[b_{2G}(1 - P_2) + b_{2B}P_2] \cdot N - a_{1G}(1 - P_1) - a_{1B}P_1 + a_{2G}(1 - P_2) + a_{2B}P_2}{b_{1G}(1 - P_1) + b_{1B}P_1 + b_{2G}(1 - P_2) + b_{2B}P_2} \quad (6)$$

$$x_2^{UE,NT} = \frac{[b_{1G}(1 - P_1) + b_{1B}P_1] \cdot N + a_{1G}(1 - P_1) + a_{1B}P_1 - a_{2G}(1 - P_2) - a_{2B}P_2}{b_{1G}(1 - P_1) + b_{1B}P_1 + b_{2G}(1 - P_2) + b_{2B}P_2} \quad (7)$$

记 $a_{1G}(1 - P_1) + a_{1B}P_1 = a_1$,
 $b_{1G}(1 - P_1) + b_{1B}P_1 = b_1$, $a_{2G}(1 - P_2) + a_{2B}P_2 = a_2$,
 $b_{2G}(1 - P_2) + b_{2B}P_2 = b_2$,那么无收费下的均衡解与出
行时间、出行成本为

$$x_1^{UE,NT} = \frac{b_2N - a_1 + a_2}{b_1 + b_2} \quad (8)$$

$$x_2^{UE,NT} = \frac{b_1N + a_1 - a_2}{b_1 + b_2} \quad (9)$$

$$t_i^{UE,NT} = \frac{b_1b_2N + a_1b_2 + a_2b_1}{b_1 + b_2}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

$$T_i^{UE,NT} = C_i^{UE,NT} = \frac{b_1b_2N + a_1b_2 + a_2b_1}{b_1 + b_2} N \quad (11)$$

当为不完美信息条件时, $0 < P_i < 1$,均衡解即
为式(8)–(11);当为完美信息条件时, $P_i = 0$ 或 1 ,如
已获知路径1的道路条件 con1 为好,则 $P_1 = 0$;路径
2的道路条件 con2 为坏,则 $P_2 = 1$,代入式(8)–
(11)即可得到此时均衡解。

(2) 系统最优(SO)

假设司机能接受统一调度安排,以系统总出行
时间最小化为目标进行出行选择,可以构建数学规
划问题如下:

$$\min z(x) = \sum_{i=1}^2 x_i t_i(x_i) \quad (12)$$

$$\text{s. t. } x_1 + x_2 = N$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2$$

可得无收费下的系统最优解及出行时间、出行
成本为

$$x_1^{SO,NT} = \frac{2b_2N - a_1 + a_2}{2(b_1 + b_2)} \quad (13)$$

1.1.1 无收费

(1) 用户均衡(UE)

假设司机均以最大化自身效用(即最小化出行
成本)为目的进行出行选择,根据用户均衡原理,构
建数学规划问题如下:

$$\min z(x) = \sum_{i=1}^2 \int_0^{x_i} t_i(x) dx \quad (5)$$

$$\text{s. t. } x_1 + x_2 = N$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2$$

可得:

$$x_2^{SO,NT} = \frac{2b_1N + a_1 - a_2}{2(b_1 + b_2)} \quad (14)$$

$$t_1^{SO,NT} = \frac{2b_1b_2N + 2a_1b_2 + a_1b_1 + a_2b_1}{2(b_1 + b_2)} \quad (15)$$

$$t_2^{SO,NT} = \frac{2b_1b_2N + 2a_2b_1 + a_1b_2 + a_2b_2}{2(b_1 + b_2)} \quad (16)$$

$$T_i^{SO,NT} = C_i^{SO,NT} = \frac{4b_1b_2N^2 + 4a_1b_2N + 4a_2b_1N - (a_1 - a_2)^2}{4(b_1 + b_2)} \quad (17)$$

1.1.2 最优收费

(1) 用户均衡

实施收费时,司机的出行成本不仅仅是出行时
间,还需考虑缴纳的通行费,假设出行者的时间价值
系数为1,可以构建数学规划问题如下:

$$\min z(x) = \sum_{i=1}^2 \int_0^{x_i} (t_i(x) + \tau_i) dx \quad (18)$$

$$\text{s. t. } x_1 + x_2 = N$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2$$

可得收费下的均衡解及出行时间、出行成本为

$$x_1^{UE,T} = \frac{b_2N - a_1 + a_2 - \tau_1 + \tau_2}{b_1 + b_2} \quad (19)$$

$$x_2^{UE,T} = \frac{b_1N + a_1 - a_2 + \tau_1 - \tau_2}{b_1 + b_2} \quad (20)$$

$$t_1^{UE,T} = \frac{b_1b_2N + a_1b_2 + a_2b_1 + (\tau_2 - \tau_1)b_1}{b_1 + b_2} \quad (21)$$

$$t_2^{UE,T} = \frac{b_1b_2N + a_1b_2 + a_2b_1 + (\tau_1 - \tau_2)b_2}{b_1 + b_2} \quad (22)$$

$$C_i^{UE,T} = t_i + \tau_i = \frac{b_1b_2N + a_1b_2 + a_2b_1 + b_1\tau_2 + b_2\tau_1}{b_1 + b_2}, \quad i = 1, 2 \quad (23)$$

$$T_t^{UE,T} = \frac{b_1 b_2 N^2 + a_1 b_2 N + a_2 b_1 N + (a_2 - a_1 + \tau_2 - \tau_1)(\tau_2 - \tau_1)}{b_1 + b_2} \quad (24)$$

$$C_t^{UE,T} = \frac{b_1 b_2 N + a_1 b_2 + a_2 b_1 + b_1 \tau_2 + b_2 \tau_1}{b_1 + b_2} N \quad (25)$$

(2) 系统最优

实施收费时,最优拥挤收费可实现管理者的目标:最小化系统总出行时间,因此,数学规划问题与无收费时相同(最优化问题式(12)),收费下的系统最优解(路径流量)及出行时间与无收费下相同,即式(13)–(17)。

从管理者角度来看,实施最优拥挤收费可实现系统总出行时间最小,但是从出行者个体角度来看,只能实现用户均衡(每个出行者的出行成本相等),如果将收费下的用户均衡出行成本(为出行时间和收费两项之和)以时间单位计,应与无收费下系统最优的出行时间相等,因此,最优收费使系统达到用户均衡(每个出行者的出行成本相等),同时也达到系统最优(系统总出行时间最小),联立式(13)与式(19)(或式(14)和式(20))可得两路径最优收费应满足以下关系:

$$\tau_2 - \tau_1 = \frac{a_{1G}(1 - P_1) + a_{1B}P_1 - a_{2G}(1 - P_2) - a_{2B}P_2}{2} = \frac{a_1 - a_2}{2} \quad (26)$$

1.2 一般路网

考虑不确定环境下最优收费模型的普适性,将两路径路网中不确定环境下的最优收费模型推演至一般路网。假定一般交通网络 $G=(N, A)$, 其中 N 为网络节点集, A 为网络中的路段集。令 a 表示 A 中的任一路段, x_a 表示路段 $a \in A$ 上的流量, 发生事故的概率为 P_a ($0 \leq P_a \leq 1$), 收费为 τ_a ; R 表示网络中的起点集合, S 表示网络中的讫点集合, rs 为 OD 对集合 $R \times S$ 中的任一 OD 对, 其中 $r \in R, s \in S$; K 表示所有路径组成的集合, k 为 K 中的任一条路径, f_k^{rs} 表示 OD 对 rs 间路径 k 上的流量, q^{rs} 表示 OD 对 rs 间的交通需求; t_a 表示路段 a 上的出行时间, 有无完美信息条件下路段 a 的出行时间表达式同式(3)与式(4); $\delta_{a,k}^{rs}$ 表示 0-1 变量, 若路段 a 在路径 k 上, 则 $\delta_{a,k}^{rs} = 1$, 否则 $\delta_{a,k}^{rs} = 0$ 。

依据用户均衡与系统最优原理, 构建数学规划问题如下:

(1) 无收费下的用户均衡

$$\min z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x) dx \quad (27)$$

$$\text{s. t. } q^{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \quad \forall r, s$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \quad a \in A$$

$$x_a \geq 0, \quad a \in A$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall r, s, k$$

(2) 最优收费下的用户均衡

$$\min z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} (t_a(x) + \tau_a) dx \quad (28)$$

$$\text{s. t. } q^{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \quad \forall r, s$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \quad a \in A$$

$$x_a \geq 0, \quad a \in A$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall r, s, k$$

(3) 无收费/最优收费下的系统最优

$$\min z(x) = \sum_{a \in A} x_a t_a(x_a) \quad (29)$$

$$\text{s. t. } q^{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \quad \forall r, s$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \quad a \in A$$

$$x_a \geq 0, \quad a \in A$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall r, s, k$$

一般路网在有完美信息下的最优拥挤收费求解思路与两路径路网相同,但在模型求解细节上存在以下差异:

(1)在模型求解时,根据用户均衡与系统最优原理求出各条件下的用户均衡解与系统最优解,不同路网在不同条件求解时存在的差异在于路径阻抗函数组成的不同,在两路径路网中,各路径有无发生事故时的阻抗仅由单路段阻抗组成(式(1)与式(2)),推演至一般路网时,各路径道路状况不再被简单地描述为有无发生事故,而是由有无发生事故的路路段组成,各路段有无发生事故时的阻抗形式同式(1)与式(2),此时各路径阻抗则由多路段阻抗组成;

(2)由多条路段组成的路径的事故概率等于所组成路段的事故概率之积;

(3)基于最优收费原理,系统达到用户均衡同时也达到系统最优,因此联立最优收费下的 UE 解与 SO 解,便可求得最优收费所满足的关系式(路段拥挤收费之差),当某一路段的拥挤收费确定后,其余各路段的最优收费标准即可确定。

2 实验设计

本实验招募80名在校本科生作为实验对象,被试者均等分为4组,每组20人,每组被试者参与一个实验场景,模拟每天早高峰时从家到工作地的出行。

为方便实验的操作与数据统计,以两路径路网为实验路网,验证不确定环境下的最优收费模型,深入探究信息与最优收费的实施对出行者路径选择行为的影响。其中路径1不发生事故,路径2为事故多发道路,发生事故的概率为0.25。两路径的出行时间设计如下:

$$C_1 = 5 + 0.9x_1, \text{ 道路条件良好} \quad (30)$$

$$C_{2G} = 13 + 0.1x_2, P = 0.75, \text{ 道路条件良好} \quad (31)$$

$$C_{2B} = 17 + 0.6x_2, P = 0.25, \text{ 道路发生事故} \quad (32)$$

实验条件将收费政策与信息发布相结合。收费政策为无收费与实施最优收费(仅对路径1进行收费);信息发布为完美信息条件与不完美信息条件,如表1所示。基于此,共设置4个实验场景:无收费与不完美信息场景、无收费与完美信息场景、最优收费与不完美信息场景(收费为4.5元)和最优收费与完美信息场景(无事故时收费为4元,发生事故时收费为6元)。需说明的是,不完美信息与完美信息条件下的最优收费是将式(30)—(32)代入式(26)得到的。

表1 信息发布内容

Tab. 1 Contents of information release

| 发布时间 | 完美信息 发布内容 | 不完美信息 发布内容 |
|---------------------|------------------------------|---|
| n 轮实验开始前 (出行前) | 路径2的事故概率、 路径2的确切道路条件 | 路径2的事故概率 |
| n 轮实验结束后 (出行后) | 两路径出行时间、 n 轮自己所选路径及积分所得 | 两路径出行时间、 n 轮自己所选路径及积分所得、 n 轮中路径2的道路条件 |

本实验要求每位被试者以最大化自身利益出发进行逐日的路径选择。每个场景均进行42轮试验,其中前2轮为预试验(不计入数据分析与积分累计)。每轮的出行成本由出行时间与道路通行费用组成,为保证被试者能够积极认真地参与实验,根据所有轮积分累计所得,将积分按一定兑换比例换算为实际报酬发放给被试者,具体计算公式如式(33)—(35)所示。为实验方便,设时间价值为1,每轮初始积分为20,被试者根据实验获得的积分兑换成金钱,兑换比例为1:4,即4积分兑换1元。被试者的出行成本、积分和报酬计算公式如下:

$$C_n = t_n + \tau \quad (33)$$

$$D = \sum_{n=1}^{40} (D_n - C_n) \quad (34)$$

$$A = D \times \eta \quad (35)$$

式中: C_n 、 t_n 分别表示第 n 轮出行成本和出行时间; D 表示所有轮累积积分; D_n 表示每轮初始积分; A 表示实际所得报酬; η 表示兑换比例,设为1/4。

计算出各场景下的UE解与SO解,作为实验结果分析的基准,如表2、表3所示,“[]”外为流量,人;“[]”内为出行成本,元。其中“总”一列的流量指两条路径流量之和,出行成本指所有人的平均出行成本。表3中,路径2未发生事故均简记为“好”,发生事故简记为“坏”。

表2 不完美信息下UE与SO状态的路径流量与出行成本

Tab. 2 Route flow and travel cost in UE and SO states under imperfect information condition

| | 无收费 | | | 收费 | | |
|----|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| | 路径1 | 路径2 | 总 | 路径1 | 路径2 | 总 |
| UE | 12 [15.8] | 8 [15.8] | 20 [15.8] | 8 [16.7] | 12 [16.7] | 20 [16.7] |
| SO | 8 [12.2] | 12 [16.7] | 20 [14.9] | 8 [16.7] | 12 [16.7] | 20 [16.7] |

表3 完美信息下UE与SO状态的路径流量与出行成本

Tab. 3 Route flow and travel cost in UE and SO states under perfect information condition

| | | 无收费 | | | 收费 | | |
|----|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | 路径1 | 路径2 | 总 | 路径1 | 路径2 | 总 |
| UE | 好 | 10 [14] | 10 [14] | 20 [14] | 6 [14.4] | 14 [14.4] | 20 [14.4] |
| | 坏 | 16 [19.4] | 4 [19.4] | 20 [19.4] | 12 [21.8] | 8 [21.8] | 20 [21.8] |
| SO | 好 | 6 [10.4] | 14 [14.4] | 20 [13.2] | 6 [14.4] | 14 [14.4] | 20 [14.4] |
| | 坏 | 12 [15.8] | 8 [21.8] | 20 [18.2] | 12 [21.8] | 8 [21.8] | 20 [21.8] |

3 结果分析

3.1 路径流量

图2绘制了各场景下路径1的流量演化情况(图中“+”处代表事故轮),可看出由无收费转变为收费

时路径1的流量普遍减小,而由不完美信息转化为完美信息时,路径1在无事故时更多呈现为流量减小趋势,在发生事故时则主要呈现为流量增加;无论有无收费,在完美信息下的事故轮中,路径1流量变化趋势相似,均在事故轮突增而后在下一轮又减少。为直观观察路径流量演变与均衡间的关系,图3绘制了各场景下路径1的流量与用户均衡流量的差值(均衡差)的40轮演变情况,例如无收费与不完美场景下,第一轮路径1流量为7人,路径1的用户均衡

流量为12人(表2),则第1轮的均衡差等于路径1流量与路径1用户均衡流量之差($7-12=-5$)。可看出前期流量在均衡附近大幅波动,某些轮会出现流量突增的情况,后期流量仍在均衡附近持续波动,但波动幅度显著变小,有趋于均衡的趋势;事故轮中路径流量虽产生剧烈变化,但总体上,除了第3轮外,其他事故轮并未因此形成较大的均衡差,因此,即使发生事故,被试者也能够较好地地进行内部调节使得总体趋于均衡。

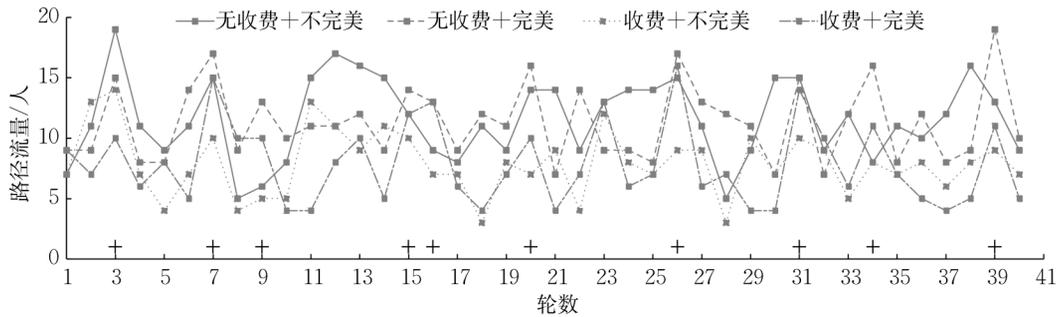


图2 路径1的逐日流量演变

Fig. 2 Day-to-day flow evolution of Route 1

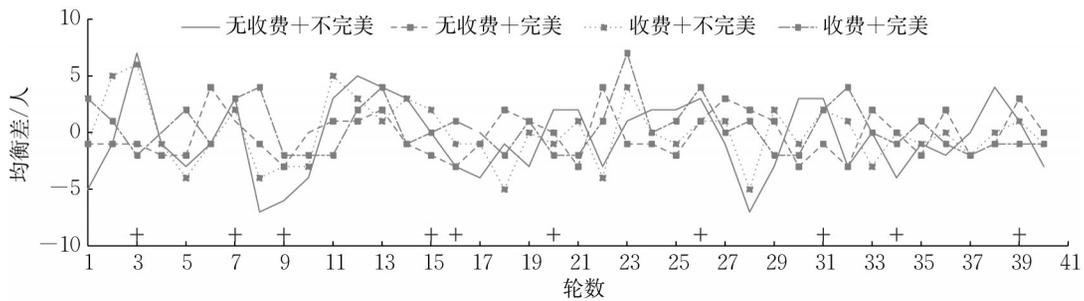


图3 路径流量与均衡流量的差值演变

Fig. 3 Evolution of the difference between actual route flow and user equilibrium flow

表4列出了各条件下路径1流量的均值和标准差,以定量描述各条件下路径流量的波动情况。

表4 路径1流量的均值与标准差

Tab. 4 Mean and standard deviation of traffic flow on Route 1

| | 无收费+不完美信息 | 无收费+完美信息 | 收费+不完美信息 | 收费+完美信息 |
|-----|-----------|----------|----------|---------|
| 均值 | 11.550 | 11.325 | 7.925 | 7.875 |
| 标准差 | 3.396 | 3.141 | 2.683 | 3.360 |

可看出收费与不完美信息条件下的标准差最小,流量波动最稳定。路网流量波动稳定表示流量在均值附近稳定,并不意味着在均衡流量附近稳定,也即路网流量波动稳定并不能说明趋于均衡的趋势稳定。为了定量描述路网系统与均衡间的关系,表5列出了各条件下均衡差的均值和标准差,可看出在

总体40轮的流量演变中,无收费与完美信息条件下的均值与标准差均为最小,但在后期20轮中,该条件下趋于均衡的趋势并未增强,后期均衡差反而高于总体平均水平,其他场景下后期均衡差均低于平均水平,其中当收费与完美信息结合时,在实验前期、后期都较好地推动路网流量趋于均衡,因此在推动路网流量趋于均衡的效果上,收费与完美信息条件下最稳定。

为定量描述各条件下均衡差的变化趋势,本文采用Mann-Kendall趋势检验法进行检验。原假设 H_0 :随着实验轮数的增加,均衡差无单调趋势;备择假设 H_1 :随着实验轮数的增加,均衡差存在单调趋势。标准化后的检验统计量用 Z 表示,计算如式(36)所示,拒绝 H_0 的条件为: $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 。其中 Z

(负)的 Z 表明均衡差随着轮数的增加有增大(减小)的趋势。显著性水平 $\alpha=0.05$ 和 0.01 的双边检验结果如表6所示。可发现,除无收费与完美信息条件外,其他各条件下的均衡差随着轮数的增加均具有下降趋势,且仅在收费与不完美信息条件下趋势显著。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (36)$$

式中: $S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j)$, $\text{sign}()$ 为符号函数, n

表5 均衡差的均值与标准差

Tab. 5 Mean and standard deviation of equilibrium difference

| | 无收费+不完美信息 | 无收费+完美信息 | 收费+不完美信息 | 收费+完美信息 |
|-----------|-----------|----------|----------|---------|
| 总平均均衡差 | 2.850 | 1.675 | 2.075 | 1.725 |
| 标准差 | 1.847 | 1.047 | 1.670 | 1.414 |
| 前20轮平均均衡差 | 3.300 | 1.500 | 2.600 | 1.750 |
| 标准差 | 2.003 | 1.000 | 1.759 | 1.164 |
| 后20轮平均均衡差 | 2.400 | 1.850 | 1.550 | 1.700 |
| 标准差 | 1.603 | 1.089 | 1.432 | 1.658 |

为样本量。当 $X_i - X_j$ 小于、等于或大于零时, $\text{sign}(X_i - X_j)$ 分别为 $-1, 0, 1$ 。 S 服从正态分布,均值为0,方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

表6 Mann-Kendall趋势检验

Tab. 6 Mann-Kendall trend test

| 实验场景 | 检验统计量 | | 趋势性 |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| | $\alpha=0.05$ | $\alpha=0.01$ | |
| 无收费+不完美信息 | $ Z = -1.6311 $ < 1.9600 | $ Z = -1.6311 $ < 2.5758 | 均无显著趋势性 |
| 无收费+完美信息 | $ Z = 0.5126 $ < 1.9600 | $ Z = 0.5126 $ < 2.5758 | 均无显著趋势性 |
| 收费+不完美信息 | $ Z = -2.5982 $ > 1.9600 | $ Z = -2.5982 $ > 2.5758 | 均具有显著减小趋势 |
| 收费+完美信息 | $ Z = -1.1884 $ < 1.9600 | $ Z = -1.1884 $ < 2.5758 | 均无显著趋势性 |

3.2 路径切换

图4绘制了路径切换的变化情况。

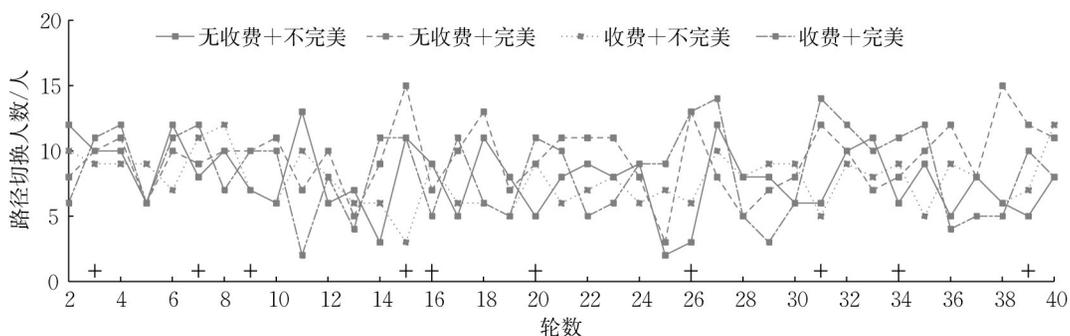


图4 平均路径切换

Fig. 4 Average route switches

可以看出:(1)各条件下前10轮中进行路径切换的人数均较高,被试者均处于不断熟悉出行路网环境的状态,而后开始大幅度波动;(2)无收费时,完美信息下的切换人数在大多数轮中(尤其是在事故轮)会略高于不完美信息,其他场景间差异较不

明显。

为更清晰地观察各条件下路径切换的波动与差异,表7、表8分别统计了总体与各道路条件下路径切换人数的均值与标准差,并基于Mann-Whitney法检验各条件下路径切换的差异,可以看出:(1)收费

与不完美信息条件下路径切换人数最少且波动最小。(2)当由不完美信息转为完美信息时,路径切换人数增加,在无收费时增加显著($P < 0.05$),由于此时路径2无论是否发生事故均使得路径切换人数增加,且在路径2发生事故时,有一半的被试者进行切换;在收费时增加量减小,其中无论是否发生事故,均产生更少的切换行为,可发现收费有效抑制了完美信息下的路径切换行为。(3)当由无收费转为收费时,路径切换减少,虽然均不显著,但是从减少的百分比来看,再次发现收费在完美信息下的抑制作用更大,这是由于道路条件良好时的路径切换减少量

远大于发生事故的路径切换增加量。

表7 各场景下的路径切换人数

Tab. 7 Number of route switches in each scenario

| | | 无收费 | 收费 | 变化/% | P值 |
|-------|--------|------------------|------------------|-------|-------|
| 不完美信息 | 均值[频率] | 7.846 [0.392] | 7.744 [0.387] | -1.3 | 0.862 |
| | 标准差 | 2.671 | 2.009 | | |
| 完美信息 | 均值[频率] | 9.410 [0.471] | 8.462 [0.423] | -10.1 | 0.280 |
| | 标准差 | 2.613 | 3.267 | | |
| 变化/% | | +19.9 | +9.3 | | |
| P值 | | 0.015 | 0.275 | | |

表8 不同道路条件下的路径切换人数

Tab. 8 Number of route switches under different road conditions

| | | 不完美信息 | | 完美信息 | | 变化/% | | P值 | |
|------|------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | | 好 | 坏 | 好 | 坏 | 好 | 坏 | 好 | 坏 |
| 无收费 | 均值 | 8.138 | 7.00 | 9.034 | 10.500 | | | | |
| | [频率] | [0.407] | [0.350] | [0.452] | [0.525] | +11.0 | +50.0 | 0.246 | 0.008 |
| | 标准差 | 2.709 | 2.494 | 2.598 | 2.464 | | | | |
| 收费 | 均值 | 7.828 | 7.500 | 7.655 | 10.800 | | | | |
| | [频率] | [0.391] | [0.375] | [0.383] | [0.540] | -2.2 | +44.0 | 0.638 | 0.003 |
| | 标准差 | 1.910 | 2.369 | 3.165 | 2.394 | | | | |
| 变化/% | | -3.8 | +7.1 | -15.3 | +2.9 | | | | |
| P值 | | 0.555 | 0.616 | 0.089 | 0.538 | | | | |

将被试者的路径切换策略定义为4类:由路径1切换至路径2、由路径2切换至路径1、保持选择路径1以及保持选择路径2。被试者采用每种策略的统计结果如表9所示,该表为39轮切换的统计结果。各条件下均为保持路径选择的被试者占多数,由t检验结果可看出,无收费下被试者显著倾向于保持选择路径1,而在收费下则显著倾向于保持选择路径2,进而避免了完美信息下过多流量集中至路径1而造成拥堵。在路径切换中可发现各条件下平均每轮约有40%的被试者进行切换,但路径1与路径2间相互切换的次数相近,被试者间的相互作用使得路网系统总体仍处于平衡。为进一步了解路径切换与保持带来的影响,表10统计出了本轮成本比上轮小/大时的路径切换与保持的次数,该表为39轮切换的统计结果。可看出无收费时,进行路径切换多数会造成本轮成本的增加,而保持路径选择则主要带来成本的减少,且经Spearman相关性检验表明切换与成本增加的相关性显著;而收费时路径切换使得本轮成本减少的却占多数,且切换与成本增加不呈显著相关性,由于收费促使路网系统的通行效率提升,出行者若能根据经验学习做出合理的路径切换,能减少出行成本。

为探究事故轮的路径切换,表11、表12分别统

表9 路径切换策略的次数

Tab. 9 Number of each route switching strategy

| 路径切换策略 | 无收费+不完美信息 | 无收费+完美信息 | 收费+不完美信息 | 收费+完美信息 |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 路径1→路径2 | 152 | 183 | 151 | 167 |
| 路径2→路径1 | 154 | 184 | 151 | 163 |
| 保持选择路径1 | 301 | 260 | 159 | 143 |
| 保持选择路径2 | 173 | 153 | 319 | 307 |
| | $P < 0.001$ | $P < 0.001$ | $P < 0.001$ | $P < 0.001$ |

表10 本轮出行成本比上轮小/大时的路径切换与保持的次数

Tab. 10 Number of route switching and holding at a smaller/larger travel cost of the current round than that of the previous round

| | | 无收费 | 收费 |
|-------|------|--------|-------|
| 不完美信息 | 路径切换 | 比上轮成本小 | 135 |
| | | 比上轮成本大 | 171 |
| | 路径保持 | 比上轮成本小 | 265 |
| | | 比上轮成本大 | 209 |
| P值 | | 0.001 | 0.284 |
| 完美信息 | 路径切换 | 比上轮成本小 | 172 |
| | | 比上轮成本大 | 195 |
| | 路径保持 | 比上轮成本小 | 240 |
| | | 比上轮成本大 | 173 |
| P值 | | 0.002 | 0.338 |

计了事故轮至下一轮路径 2 的平均流量变化、事故轮至下一轮的路径切换策略情况,并列出 t 检验结果。在表 12 中,路径切换中 t 检验的原假设为“每轮路径 1 与路径 2 间相互切换的平均人数无显著差异”,路径保持中 t 检验的原假设为“每轮保持选择路径 1 与保持选择路径 2 的平均人数无显著差异”。可以看出:事故轮中保持选择的被试者倾向性与总体相一致,无收费下倾向于保持选择路径 1,收费下倾向于保持选择路径 2;进行切换的被试者均倾向于切换至路径 2,各条件下路径 2 的平均流量均增加,在完美信息下此倾向性更明显 ($P < 0.001$),此时路径 2 的吸引力骤增,流量增加也极为显著 ($P < 0.001$)。路径 2 流量的变化在连续发生事故时(15、16 轮)尤为明显,不完美信息下的被试者变得保守,切换至路径 2 的人数减少至较低水平,而完美信息下切换至路径 2 的人数再次骤增。

表 11 事故轮至下一轮路径 2 的平均流量变化情况

Tab. 11 Variation of average flow on route 2 from the accident round to the next round

| | 无收费 | 收费 |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| 不完美信息 | +3.1 ($P=0.047$) | +1.8 ($P=0.069$) |
| 完美信息 | +6.1 ($P < 0.001$) | +5.1 ($P < 0.001$) |

注:此处 t 检验的原假设为“事故轮与其下一轮间路径 2 的平均流量无显著差异”

3.3 出行时间

图 5 描述了出行时间的演变情况,表 13 对各场景下的出行时间进行了统计,可以看出:(1)收费与

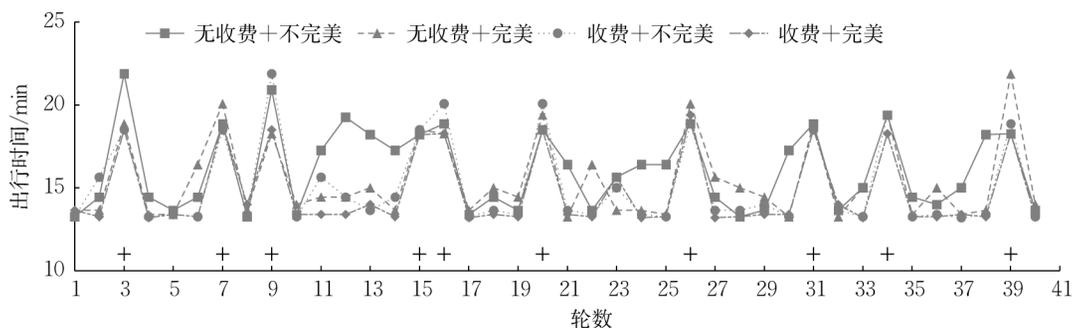


图 5 出行时间

Fig. 5 Travel time

3.4 出行成本

表 14 对各场景下的出行成本进行了统计,可以看出:(1)无收费与完美信息场景下的出行成本最小,与理论相吻合;(2)收费的实施增加出行成本,Mann-Whitney 统计检验结果表明,有无收费在完美

表 12 事故轮至下一轮的路径切换策略次数

Tab. 12 Number of each route switch strategy from the accident round to the next round

| | | 无收费 | 收费 | |
|----------|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 不完美信息 | 路径切换 | 路径 1→路径 2 | 5.9 | 5.1 |
| | | 路径 2→路径 1 | 2.8 | 3.3 |
| | | | ($P=0.008$) | ($P=0.048$) |
| | 路径保持 | 保持选择路径 1 | 6.7 | 3.8 |
| 保持选择路径 2 | | 4.6 | 7.8 | |
| | | ($P=0.098$) | ($P < 0.001$) | |
| 完美信息 | 路径切换 | 路径 1→路径 2 | 8.0 | 7.6 |
| | | 路径 2→路径 1 | 1.9 | 2.5 |
| | | | ($P < 0.001$) | ($P < 0.001$) |
| | 路径保持 | 保持选择路径 1 | 7.5 | 4.6 |
| 保持选择路径 2 | | 2.6 | 5.3 | |
| | | ($P < 0.001$) | ($P=0.553$) | |

完美信息场景下的平均出行时间最小,与理论相吻合;(2)Mann-Whitney 检验结果显示出 0.05 的显著性水平上,有无收费的出行时间差异显著,收费与完美信息的实施虽然均能减少出行时间,但只有收费政策下出行时间减少效果显著;(3)在无收费下由不完美信息转为完美信息时,以及在不完美信息下由无收费转为收费时,出行时间减少量均高于理论值,获得了超过预期的效果;收费下由不完美信息转为完美信息时,以及完美信息下由无收费转为收费时,出行时间减少量均低于理论值,可能原因是收费与信息存在相互抑制作用,使得两种措施的结合并未获得最大化效益;(4)单独实施收费或发布完美信息,虽在总体上降低了出行时间,但均使发生事故下的出行时间产生小幅增长;而收费与完美信息的结合,无论是否发生事故,均使得出行时间减少。

信息条件下产生显著差异 ($P=0.032$);完美信息的实施则可减少出行成本;(3)在无收费下由不完美信息转为完美信息时,出行成本减少量高于理论值,在不完美信息下由无收费转为收费所产生的出行成本增加量低于理论值;而收费下由不完美信息转为完

表13 各场景下的平均出行时间对比

Tab. 13 Comparison of average travel time under each scenario

| | | 平均出行时间/min | | | | | | P值 |
|-------|---|------------|-------|--------|-------|------|------|-------|
| | | 无收费 | | 收费 | | 变化/% | | |
| | | 实验 | 理论 | 实验 | 理论 | 实验 | 理论 | |
| 不完美信息 | 好 | 15.047 | | 13.687 | | -9.0 | | 0.011 |
| | 坏 | 19.265 | 15.8 | 19.318 | 14.9 | +0.3 | -5.7 | |
| | 总 | 16.101 | | 15.094 | | -6.3 | | |
| 完美信息 | 好 | 14.173 | 14 | 13.455 | 13.2 | -5.1 | -5.7 | 0.002 |
| | 坏 | 19.363 | 19.4 | 18.530 | 18.2 | -4.3 | -6.2 | |
| | 总 | 15.471 | 15.35 | 14.724 | 14.45 | -4.8 | -5.9 | |
| 变化/% | 好 | -5.8 | | -1.7 | | | | |
| | 坏 | +0.5 | | -4.1 | | | | |
| | 总 | -3.9 | -2.8 | -2.5 | -3.0 | | | |
| P值 | | 0.260 | | 0.124 | | | | |

美信息时,出行成本减少量低于理论值,完美信息下由无收费转为收费时,出行成本增加量高于理论值,进一步证明了收费与信息存在相互抑制作用。

表14 各场景下的平均出行成本对比

Tab. 14 Comparison of average travel cost under each scenario

| | | 无收费/min | | 收费/min | | 变化/% | | P值 |
|------|--------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | | 实验 | 理论 | 实验 | 理论 | 实验 | 理论 | |
| | | 不完美信息 | 好 | 15.047 | | 15.397 | | |
| 坏 | 19.265 | | 15.8 | 21.320 | 16.7 | +10.7 | +5.7 | |
| 总 | 16.101 | | | 16.878 | | +4.8 | | |
| 完美信息 | 好 | 14.173 | 14 | 14.742 | 14.4 | +4.0 | +2.9 | 0.032 |
| | 坏 | 19.363 | 19.4 | 22.190 | 21.8 | +14.6 | +12.4 | |
| | 总 | 15.471 | 15.35 | 16.604 | 16.25 | +7.3 | +5.9 | |
| 变化/% | 好 | -12.0 | -11.4 | -4.3 | -13.8 | | | |
| | 坏 | +20.3 | +22.8 | +4.1 | +30.5 | | | |
| | 总 | -3.9 | -2.8 | -1.6 | -2.7 | | | |
| P值 | | 0.260 | | 0.070 | | | | |

4 结论

(1)在各条件下,路网流量后期持续小幅波动,但有趋于均衡的趋势,即使发生事故,被试者也能较好地进行内部调节使得总体趋于均衡。无任何措施条件下,系统的流量波动最大,收费与不完美信息条件下流量波动最小,路网流量的波动最稳定。

(2)被试者在前期处于不断熟悉出行路网环境的状态,致使路径切换人数较多,经过不断的学习与经验积累,被试者进行有策略的路径选择,路径切换人数也因此开始波动变化,其中完美信息会增加路径切换的人数,收费则相反,并能有效抑制完美信息导致的路径切换行为。在路径选择策略中,被试者主要采取的策略为路径保持,其中无收费时倾向于

良好路径,而当此路径实施收费后,被试者转而倾向于事故路径,进而避免了完美信息下过多流量集中至良好路径而造成的拥堵。

(3)在事故轮的路径保持策略中,无收费时被试者倾向于良好路径,收费时倾向于事故路径;而在路径切换策略中,被试者均倾向于切换至事故路径,尤其在完美信息下,大大加强了事故路径的吸引力。

(4)无收费时,路径切换会带来成本的增加,而收费时切换与成本增加相关性不显著,被试者通过切换更多的是带来了成本的减少,由于收费促使路网系统的通行效率提升,减少了出行成本大幅波动的风险。

(5)在出行成本上,完美信息的实施可减少出行成本,收费则增加出行成本;在出行时间上,完美信息与收费均能减少出行时间,实施收费时的出行时间减少效果更显著,收费与信息的结合优于二者的单独实施,但信息与拥挤收费存在相互抑制作用,使得两种措施的结合并未获得最大化效益。

作者贡献声明:

刘诗序:研究构思、论文修改、学术指导、项目支持。

王叔雨:模型推导、实验设计、论文初稿撰写。

黄国良:论文修改。

孙浩岩:研究讨论。

钟家承:数据处理。

黄易丹:实验参与。

参考文献:

- [1] IIDA Y, UNO N, YAMADA T. Experimental analysis approach to analyze dynamic route choice behavior of driver with travel time information [C]//Yokohama: Vehicle Navigation & Information Systems Conference. [S.l.]: IEEE, 1994: 377-382.
- [2] TANAKA M, UNO N, SHIOMI Y, *et al.* Experimental study of effects of travel time distribution information on dynamic route choice behavior [J]. *IVHS Journal*, 2014, 18 (2): 215.
- [3] BEN-ELIA E, PACE R D, BIFUICO G N, *et al.* The impact of travel information's accuracy on route-choice [J]. *Transportation Research Part C*, 2013, 26: 146.
- [4] 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.
- [5] IMANTS P, THEEUWES J, BRONKHORST A W, *et al.* Effect of multiple traffic information sources on route choice: A driving simulator study [J]. *Transportation Research Part F*,

- 2021, 81(1): 1.
- [6] LONG X, ZHAO H, ZHOU M, *et al.* Switching threshold of commuting travelers' route choice under different patterns of information [J]. *Travel Behaviour and Society*, 2021, 23 (6): 216.
- [7] 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. YIN Zikun, GUAN Hongzhi, 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.
- [8] 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.
- [9] RAPOPORT A, GISCHES E J, DANIEL T, *et al.* Pre-trip information and route-choice decisions with stochastic travel conditions: experiment [J]. *Transportation Research Part B*, 2014, 68: 154.
- [10] LINDSEY, R, RAPOPORT A, GISCHES E J, *et al.* Pre-trip information and route-choice decisions with stochastic travel conditions: theory [J]. *Transportation Research Part B*, 2014, 67: 187.
- [11] YU Y, HAN X, JIANG R, *et al.* Departure time and route choices with accurate information under binary stochastic bottleneck capacity in the morning commute [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 225551.
- [12] PIGOU A C. *The economics of welfare* [M]. London: MacMillan, 1920.
- [13] WALTERS A A. The theory and measurement of private and social cost of highway congestion [J]. *Econometrica*, 1961, 29 (4): 676.
- [14] YANG H. System optimum, stochastic user equilibrium, and optimal link tolls [J]. *Transportation Science*, 1999, 33 (4): 354.
- [15] SMITH M J. The marginal cost taxation of a transportation network [J]. *Transportation Research Part B*, 1979, 13 (3): 237.
- [16] KWON J, MAUCH M, VARAIYA P. Components of congestion: Delay from incidents, special events, lane closures, weather, potential ramp metering gain, and excess demand [J]. *Transportation Research Record*, 2006, 30 (1959): 84.
- [17] HALL J D, SAVAGE I. Tolling roads to improve reliability [J]. *Journal of Urban Economics*, 2019, 113: 103187.
- [18] KOBAYASHI K, DO M. The informational impacts of congestion tolls upon route traffic demands [J]. *Transportation Research Part A*, 2005, 39(7): 651.
- [19] YANG L, ZHENYU Y. Information provision and congestion pricing in a risky two-route network with heterogeneous travelers [J]. *Transportation Research Part C*, 2021, 128: 103083.
- [20] ZHANG W J, ZHAO Y, LI Y, *et al.* Research on subjective feasibility evaluation of congestion pricing [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 137: 12.
- [21] ANDERSON L R, HOLT C A, REILEY D, *et al.* Congestion pricing and welfare: An entry experiment [J]. *Environmental Economics & Experimental Methods*, 2008, 1: 280.
- [22] HARTMAN J L. Special issue on transport infrastructure: A route choice experiment with an efficient toll [J]. *Networks & Spatial Economics*, 2012, 12(2): 205.
- [23] GABUTHY Y, NEVEU M, DENANT-BOËMONT L, *et al.* The coordination problem in a structural model of peak-period congestion: An experimental study [J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2006, 5(2): 273.