

基于出行需求的城市车辆共享模式演化分析*

付瑶, 徐恪, 苏辉



(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

通讯作者: 付瑶, E-mail: fy14@mails.tsinghua.edu.cn

摘要: 车辆共享从资源分配的角度提高了汽车资源利用率。为了激励车辆共享, 有关出行需求和出行者体验的研究势在必行。通过 DBSCAN 算法测量了城市内的交通需求聚集度, 验证了车辆共享的可行性。确定了影响用户效用的关键因素, 提出了基于 Logit 模型的数学模型以描述出行者体验和汽车资源利用率, 预测出行者选择。同时, 利用真实数据和调查结果, 使测量和模型更加准确、真实。通过仿真实验, 观测并分析了交通模式的演化过程及结果, 发现城市出行需求量和交通需求聚集度是影响交通模式演化的主要因素。出行需求量需达到一定数值, 演化才能达到稳定状态。城市出行交通需求聚集度越高, 车辆共享的参与者则越多, 其所获效用也越高。当出行需求量大于 290, 且交通需求聚集度大于 0.9 时, 所有出行者都将选择车辆共享。最后, 基于神州专车的出行数据, 实验并观测了北京市交通模式的演化, 发现若要在不加入经济因素或政策干预的情况下实施车辆共享, 其交通模式将无法达到稳定状态。

关键词: 车辆共享; 出行需求; 聚集度; 效用; 演化

中文引用格式: 付瑶, 徐恪, 苏辉. 基于出行需求的城市车辆共享模式演化分析. 软件学报, 2016, 27(Suppl. (2)): 309-319. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16045.htm>

英文引用格式: Fu Y, Xu K, Su H. Evolution of urban car sharing mode based on travel demand. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(Suppl. (2)): 309-319 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16045.htm>

Evolution of Urban Car Sharing Mode Based on Travel Demand

FU Yao, XU Ke, SU Hui

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Recently, the online car sharing is on the rise which improves the car resource utilization. In order to stimulate car sharing, the study on travel demand and user experience is essential. This paper measures the aggregation degree of travel demand in urban city through DBSCAN algorithm, which verifies the feasibility of car sharing. Mathematical models are provided based on Logit model to capture user experience and car utilization, and the user selection is predicted. Both real data and the survey result are leveraged to make the measurement and model realistic. The evolution of urban traffic mode is observed and analyzed, and it is found that the quantity of the travel demand and the traffic aggregation degree are the main factors influencing the evolution. The evolution can reach a steady state if and only if the travel demand reaches some certain value. The higher the traffic aggregation degree is, the more travelers will participate in car sharing and gain higher utilities. All the travelers will participate in the car sharing when the travel demand is larger than 290 as well as the traffic aggregation degree is larger than 0.9. Ultimately, the evolution of Beijing traffic mode is analyzed based on the real

* 基金项目: 国家自然科学基金(61170292, 61472212); 国家科技重大专项课题(2015ZX03003004); 国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB315803); 国家高技术研究发展计划(863)(2013AA013302, 2015AA015601); 欧盟 CROWN 基金(FP7-PEOPLE-2013-IRSES-610524); 清华信息科学与技术国家实验室(筹)学科交叉基金

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61170292, 61472212); National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2015ZX03003004); National Basic Research Program of China (973) (2012CB315803); National High Technology Research and Development Program of China (863) (2013AA013302, 2015AA015601); EU CROWN Fund (FP7-PEOPLE-2013-IRSES-610524); Funded by Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology

收稿时间: 2016-06-05; 采用时间: 2016-10-18

travel data from CAR Inc., which shows that the traffic mode will not reach a steady state now if car sharing is implemented without the involvement of economic factors and policies.

Key words: car sharing; travel demand; aggregation degree; utility; evolution

1 引言

目前,以 Uber、滴滴出行、神州专车为首的基于车辆共享的互联网平台势如破竹.届时,Uber、滴滴和神州专车 3 家公司的估值已分别达到 625 亿美金、280 亿美金(<http://tech.qq.com/a/20160617/036772.htm>)和 287 亿人民币(<http://stock.qq.com/a/20160413/009264.htm>).车辆共享不仅为互联网行业注入了新鲜血液,推进了共享经济的发展^[1],更对交通产生了深刻的影响.

汽车数量的增长带来了尾气排放、交通拥堵、交通事故等诸多问题.这些问题严重降低了交通效率,污染了环境.在移动网络和实时工程的支持下,交通拥堵已经通过路径规划和政策控制而有所减轻.例如:自 2008 年起,北京市实行尾号限行措施;2015 年,北京市调整了停车费用和过路费;有许多关于城市路网结构的研究.但是鲜有学者从出行者体验和资源利用率的角度来研究这个问题.

私家车数量的增长成为了汽车数量增长的主要原因.中华人民共和国国家统计局发布的统计公报显示:截至 2015 年底,北京市机动车保有量为 561.9 万辆,其中 78%为私人汽车.与 2014 年相比,机动车增长了 2.8 万辆,而私人汽车增加了 3.1 万辆.同时,72%的私人汽车为轿车.所以,我们应该采取措施来减少私家车的数量.

城市居民出行需求对交通模式的演化以及汽车效率、汽车资源利用率和出行者体验的提高是至关重要的.文献[2-5]利用人类的位置跟踪设备对城市范围内人类的移动进行了粗粒度的研究.而我们致力于研究出行需求在时间和空间上的重合度,并且,这一出行需求来自于北京市居民的真实需求.在第 2 节,我们用真实数据求得了北京市的出行需求,证明了车辆共享的可行性.在第 4 节中,我们分析了在不同的交通模式下,人们出行需求的重合度是如何影响用户体验的.

车辆共享减少了路面上的车辆数,提高了汽车资源的利用率,从根本上改善了交通状况.但是,机械地减少车的数量会降低用户体验,这将导致人们车辆共享的意愿随之降低.同时,维持车辆共享的司机数量与乘客数量的平衡也是一个重要的问题.所以,系统需要一个激励以达到均衡,使车的数量尽可能少,同时保障司机和乘客的出行体验.我们旨在解决以下几个问题:

- 城市的实际出行需求分布情况如何,是否能够实行车辆共享?
- 出行者如何选择出行方式?有多少出行者愿意参与车辆共享,愿意以何种方式(司机或乘客)参与?
- 城市交通模式演化的过程及结果是怎样的?影响演化的主要因素是什么,它们如何影响演化的?

本文做出了以下贡献:

- 基于真实数据探索并分析了城市出行需求聚集程度,验证了车辆共享的可行性.
- 建立了数学模型以描述在不同交通模式下出行者的效用和共享率.
- 提出了算法来推断人的选择和不同交通模式的市场份额.
- 利用建立的模型分析了交通模式的演化过程和结果,找出了影响演化的主要因素.

本文第 2 节展示车辆共享的可行性.第 3 节对数学模型进行介绍.第 4 节给出仿真结果和基于模型的演化的分析.第 5 节给出本文工作的总结.

2 出行需求挖掘

在这一节,我们基于真实数据得出了出行需求,验证了车辆共享的可行性.

2.1 数据格式

数据来源于神州专车 2016 年 1 月全国范围内的订单数据和车辆轨迹数据.我们从中提取出北京市的数据进行实验.

2.1.1 订单数据

订单数据描述了神州专车 2016 年 1 月北京市的订单详细情况,共 1.4G,约 1 070 万条数据,具体字段包含订单 ID、车辆 ID、城市 ID、订单状态、订单创建时间、预计乘客上车时间、预计乘客下车时间、预计乘客上车地点经纬度、预计乘客下车地点经纬度、真实乘客上车时间、真实乘客下车时间、真实乘客上车地点经纬度、真实乘客下车地点经纬度等。

2.1.2 轨迹数据

轨迹数据记载了神州专车的车辆运行轨迹.我们获取了北京市 1 月份的轨迹数据共 15.9G,具体字段包含车辆 ID、时间及其对应的车辆位置的经纬度。

2.2 行程提取

首先,通过检测订单状态、时间、位置、汽车轨迹等对原始数据进行处理.然后,提取出乘客需求的行程出发时间、起始位置和目的位置.从订单创建时间或乘客预约时间中获取乘客所期望的出发时间,从对应行程的乘客所选择的上、下车位置,即预计上、下车位置中获取乘客的起始位置和目的地.这样可以更加准确地评估乘客的真实出行需求.我们以行程作为基础分析单位,1 小时为一个时间段,提取了北京市的数据,包括在不同时间段内乘客期望的上车位置和下车位置的经纬度。

2.3 出行需求聚类

我们用 DBSCAN(density-based spatial clustering of applications with noise)聚类算法来对每段行程中的预计上、下车位置进行聚类分析.我们认为,方圆 2km 内、时间差别在 20 分钟内的出行需求是可以进行车辆共享的.于是,将上、下车位置看作点.设定邻域的半径为 2km,若 20 分钟内,某个点的邻域内有大于或等于 50 个点,即 50 个出行需求,则这个点为核心点,并为核心点建立类别.如果一个核心点的邻域中存在其他核心点,则对此类别进行扩展.遍历所有条目后,便得到了在某时间段内北京市出行需求的聚类。

2.4 可视化构建

本文用高德地图展示了北京市 2016 年 1 月份的平均出行需求。

图 1(a)和图 1(b)表示早 7:00~8:00 之间人们行程的出发点和目的地的需求聚类,其中,出发点聚合成了 4 个类别,目的地聚合成了 5 个类别。

图 2(a)和图 2(b)表示晚 17:00~18:00 之间人们行程的出发点和目的地的需求聚类,其中,出发点聚合成了 4 个类别,目的地聚合成了 5 个类别.图中的点均为类别中的核心点。

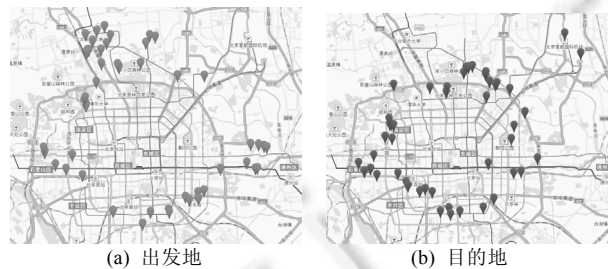


图 1 7:00~8:00 北京市出行需求聚集情况

由图 1、图 2 可见,在特定的时间段内,北京市的居民出行需求较为聚集,行程重合度高.例如:图 2 所示,金融街、CBD 等地聚集了相对较多的出行需求,而中关村附近需求较少,这是由于前者到了下班时间,人们纷纷出发回家,而后者并未到下班时间,故出行需求较少。

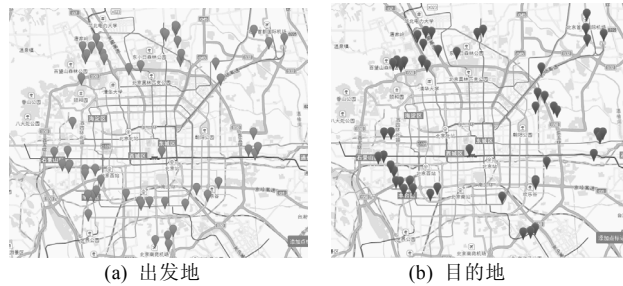


图2 17:00~18:00 北京市出行需求聚集情况

3 模型及符号释义

由于地铁、公交等公共交通方式不影响本工作的研究目标,故本文假设对于每位出行者,都有两种交通模式可选择——开私家车或与他人共享一辆车。

3.1 调查结果

2015年12月,我们对北京市出行乘车意愿及体验进行了线上问卷调查,共有117人参与调查,年龄段分布从青少年到中老年,主要集中于20岁~30岁,参与调查的男女比例约为9:4.调查结果显示如下。

(1) 假设从A地到B地,在畅通无阻的情况下所需时间为 t_0 ,乘客愿意接受的最长等待时间平均为 $0.31t_0$,最长的乘车时间平均为 $1.7t_0$;

(2) 影响乘车满意度的因素主要是车内人数、司机服务态度、车型和汽车品牌,其中,车内人数为最重要的因素;

(3) 64%的人愿意与他人共享汽车,剩余36%的人不愿意.在愿意共享车辆的人中,有8%只愿意在共享过程中作为司机,46.67%只愿意作为乘客,其余45.33%的人既愿意作为司机,也愿意作为乘客参与汽车共享;

(4) 对于有意愿参与汽车共享的人来说,最多能接受车内的人数平均为3.7人(含司机);

(5) 55.56%的被调查者有过与他人共享汽车的经历,在他们的真实经历中,平均车内有3.3人(含司机)。

3.2 基础模型

在基础模型中,我们假设每位车辆共享者的出行路线与同一汽车中其他人的出行路线的关系是完全重合、完全包含或者完全被包含的.对每个有出行需求的人来说,都有3种选择:作私家车的用户、作汽车共享的司机和作汽车共享的乘客.将这一情况看作一个系统,则该系统有3种状态:所有人都乘私家车出行、所有人都共享汽车出行和以上两种交通模式共存.我们对系统进行了建模,研究人们如何做决策,分析并找出激励汽车共享的方法,同时考虑了直接影响系统演化的用户满意度。

3.2.1 影响效用的因素

等车时间:在开始行程之前,共享汽车的乘客需要花费时间等待汽车到达,我们称其为等车时间.而这段时间对于开私家车出行的私家车用户和提供自己的汽车与他人共享的汽车共享司机来说,是可以忽略不计的.从第3.2.2节的数据分析可以得出,等车时间与相关路段上的车辆数有数学关系.在一定车辆密度范围内,等车时间会随着相关路段车辆数的增加而减少.乘客等待的时间越长,所获得的效用越低。

乘车时间:无论是乘坐私家车的人还是共享汽车的人,路上花费的时间都是行程中最主要的花销.由第3.2.2节可得,乘车时间与整个行程中路段上的车辆数相关.当车辆数增多到一定程度时会导致交通拥堵,乘车时间随之延长,而用户效用因此降低.私家车数量的增长大大提高了交通拥堵的可能性,而汽车共享则减少了路面上的车辆数.为了提高用户效用,找到私家车与共享汽车数量的最佳配比是至关重要的。

用户满意度:我们的调查问卷显示,对参与汽车共享的用户来说,最影响他们满意度的是车内的人数.故我们将车内人数作为衡量用户满意度的指标.该指标取决于用户本身的个性特征以及具体行程的具体情况。

燃油费:在基础模型中,我们假设燃油费由所有人平摊.在汽车共享中,燃油费由两个或两个以上的人平分;在私家车的整个行程中,燃油费由车主独立承担.燃油费的分担使得汽车共享的用户效用升高.

3.2.2 效用函数

我们建立一个 Logit 模型^[6,7]来描述两种交通模式下的出行者效用.Logit 模型假设每个消费者在一系列可选的物品或服务中面临着离散化的选择.在本文的背景中,每个出行者都面临着交通模式的选择——开私家车出行或者共享汽车出行.此效用决定了出行者在下一次做决策时是否会改变交通模式的选择.我们定义:

$$u_{ij} = \sum \alpha X + \mu_{ij} \quad (1)$$

为用户 i 在某一特定行程中、交通模式 j 下所获得的效用, $j=0$ 代表私家车模式, $j=1$ 代表汽车共享模式.等号右边的第 1 项 $\sum \alpha X$ 表示各个影响因素带来的所有用户的效用的统计平均值,第 2 项表示用户 i 在某次行程中的个体效用差异,服从 Gumbel 分布.矢量 X 表示上述影响效用的因素, K 为我们所考虑的因素的数量.各个因素线性加权,权重反映在 α 中.我们定义每个因素所带来的效用为用户的心理预期值与实际花销的差别.为了简化计算过程,我们对等式中的 X 进行了归一化.

在基础模型中,我们设定 $K=4$,考虑的因素包括等车时间、乘车时间、车内人数和燃油费,分别用符号 X_0, X_1, X_2, X_3 表示.式(2)为第 1 项的展开式:

$$\sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \cdot X_k = \alpha_0 \cdot \frac{(v_{t_w} - t_w)}{t_{w\max}} + \alpha_1 \cdot \frac{(v_{t_r} - t_r)}{t_{r\max}} + \alpha_2 \cdot \frac{(v_n - n)}{n_{\max}} + \alpha_3 \cdot \frac{(v_f - f)}{f_{\max}} \quad (2)$$

我们定义 v 为在不考虑交通模式的情况下,所有人对一段行程的平均心理期望值.若参数带有下角标 \max ,则表示其取对应变量取值范围内的最大值.表 1 给出了影响效用函数的具体参数.

表 1 参数定义

符号	定义
v_{t_w}	出行者平均愿意的最长等车时间
v_{t_r}	出行者平均愿意的最长乘车时间
v_n	共享汽车的人平均能接受的最多的车内共享者数量
v_f	出行者平均愿意支付的最多的燃油费
t_w	某段行程中的实际等车时间
t_r	某段行程中的实际乘车时间
n	共享汽车内实际共享者数量
f	某段行程中的实际燃油费

私家车出行者的效用:对于选择驾驶私家车出行的人, u_{i0} 表示其效用,效用函数如下:

$$u_{i0} = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \cdot X_k + \mu_{i0} \quad (3)$$

汽车共享出行者的效用:对于选择与他人共享一辆汽车出行的人, u_{i1} 表示其效用,效用函数与私家车用户的效用函数相似:

$$u_{i1} = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \cdot X_k + \mu_{i1} \quad (4)$$

对于某段行程来说,人对影响效用的各个因素的平均心理期望值是与交通模式无关的.无论人选择哪一种交通模式,对行程的固有望望值都是相同的.

等车时间和乘车时间的函数:我们利用从神州专车获取的订单数据及对应的汽车轨迹数据,拟合出了等车时间及乘车时间与相关路段上车辆数的关系:

$$t_w = f_w(N) = a_w \ln N + b_w \quad (5)$$

$$t_r = f_r(N) = (a_r \ln N + b_r) + t_0 \quad (6)$$

其中, $a_w=-4.355, b_w=30.676, a_r=0.95, b_r=-3.96$.

交通模式选择算法:在传统 Logit 模型中,用户已知每种交通模式会带来的效用,从而计算出选择某种交通

模式的概率 P ,即某种交通模式的市场占比.但在这一情况中,用户并不知道其选择其他交通模式将会获得的效用.所以我们给出了一种得到概率 P 的算法.在我们的模型中, μ 服从 Gumbel 分布,其累积分布函数为

$$\Gamma(x) = e^{-e^{-a(x-\phi)}} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \frac{1}{\delta} \quad (8)$$

$$\phi = m - \frac{\gamma}{\alpha} \quad (9)$$

其中, γ 是欧拉常数,值为 0.577 2.我们设置 $m=0, \delta=1$ 作为最大随机变量的均值和标准差.算法 1 展示了用户的交通模式选择算法.其中, q 表示有出行需求的用户的数量; P_k 和 pt 分别代表交通模式的初始市场占比和用户交通模式的转移概率, $k=0$ 代表开私家车出行, $k=1$ 代表共享车辆出行,最终交通模式的市场占比用 $finalP_k$ 表示.我们设置门限值 TH ,以判断用户下一次出行时是否改变交通模式.我们计算 T 时间段内出行情况的演化过程及结果.

算法 1. 基础模型中的用户交通模式选择.

输入: q, P_k ;

输出: $finalP_k$.

1: FOR $t=0$ to T DO

$$2: \quad N = q \times P_0 + \frac{1}{n} \times q \times p_1$$

$$3: \quad u_{ik} = \sum \alpha X + \mu_{ik}$$

4: IF $u_{ik} < TH$ THEN

$$5: \quad pt_k = \Gamma(-u_{ik})$$

6: ELSE IF $u_{ik} \geq TH$ THEN

$$7: \quad pt_k = 0$$

8: END IF

$$9: \quad nextP_k = P_k^* (1 - pt_k) + \sum_{j \neq k} P_j \times pt_j$$

10: END FOR

11: $finalP_k = nextP_k$

3.3 深入模型

从第 2.1 节的调查结果可知,只有 55.56% 的出行者愿意与他人共享车辆.一方面,一些人只想作为乘客参与汽车共享,而不愿意贡献自己的私家车来与他人共享,也不愿意贡献自己的劳动力来开车;另一方面,汽车共享可能会因为绕道而浪费时间和精力.因此,在这部分,我们将汽车共享中的司机和乘客的效用区分开来,并且考虑了汽车共享中同一辆车内的出行者的路径重合度.

司机的额外花销:司机的劳动力与汽车的磨损与消耗降低了汽车拥有者作汽车共享司机的意愿.这一因素对于乘坐私家车出行的人和共享自己汽车和劳动力的人会有影响.

聚集系数:出行路线的重合度影响了汽车共享的司机和乘客的共享意愿.低重合度将导致多余的时间和路程的花销.相反地,高重合度不仅会提高用户体验,同时也会提高资源利用率.我们引入聚集系数来表示城市交通需求聚集度,即某城市内所有出行者的出行路径的平均重合度.将目标城市划分为 M 个区域,分别用 R_0, R_1, \dots, R_{M-1} 表示.定义 $q_{ij} = \Theta(t)$ 为在 t 时刻或时间段 t 内,从 R_i 到 R_j 的交通流量,其中, $i, j \in [0, M]$.表 2 的城市交通分布 OD 表展示了城市的交通量情况.OD 交通量展示了起始点与目的地之间的交通状况.设聚集系数为

$$\gamma = \Theta(q, M, Q) = \frac{\sum (\max\{q_{ij}\} - q_{ij})^2}{(N^2 - 1)q^2} \quad (10)$$

其中, Q 表示生成交流量,即在 t 时刻或时间段 t 内,某城市内人口流量的总和. γ 越大,城市的交通需求越聚集.

$$X_1 = v_{tr} - \frac{1}{\gamma} \cdot t_r \quad (11)$$

$$X_3 = v_f - \frac{1}{\gamma} \cdot f \quad (12)$$

由此,效用函数转化为

$$u_{ij} = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \cdot X_k + \alpha_5(v_c - c) + \mu_{ij} \quad (13)$$

其中, $j=0, j=1$ 和 $j=2$ 分别表示乘坐私家车的人、汽车共享的司机与乘客的效用。 v_c 表示当人作为司机时,平均愿意付出的最大额外花销,包括开车的体力劳动、汽车磨损等。 c 表示司机的平均真实额外花销。

表 2 交通分布 OD 表

O/D	R_0	...	R_j	...	R_{M-1}	TG
R_0	q_{00}	...	q_{0j}	...	q_{0M-1}	O_0
...
R_i	q_{i0}	...	q_{ij}	...	q_{iM-1}	O_i
...
R_{M-1}	q_{M-10}	...	q_{M-1j}	...	q_{M-1M-1}	Q_{M-1}
TA	D_0	...	D_j	...	D_{M-1}	Q

交通模式选择算法:在这一部分,我们提供一种算法,推断人们如何基于之前的经验来作决策。定义 β_l 为选择不同交通模式的出行者的比例。 $l=0, l=1$ 和 $l=2$ 分别代表只想开私家车出行的人、愿意作汽车共享的司机的人和愿意作汽车共享乘客的人。根据第 2.1 节的调查结果,可以算出 $\beta_0=0.36, \beta_1=0.20, \beta_2=0.44$ 。

算法 2. 深度模型中的用户交通模式选择。

输入: q, P_k ;

输出: $finalP_k$ 。

1: FOR $t=0$ to T DO

2: $N=q \times P_0 + q \times P_1$

3: $u_{ik} = \sum \alpha X + \mu_{ik}$

4: IF $u_{ik} < TH$ THEN

5: $pt_k = \Gamma(-u_{ik})$

6: $pt_{kl} = \frac{\beta_l}{\sum_{l' \neq k} \beta_{l'}} \cdot pt_k$

7: ELSE IF $u_{ik} \geq TH$ THEN

8: $pt_k = pt_{kl} = 0$

9: END IF

10: $nextP_k = P_k \times (1 - pt_k) + \sum_{j \neq k} P_j \times pt_{kj}$

11: END FOR

12: $finalP_k = nextP_k$

4 演化过程及结果

首先,我们基于之前建立的模型对交通模式的演化进行了仿真,并得出了一些结论;然后,我们利用神州专车的真实出行数据,观测并分析了交通模式的演化。

4.1 参数设置

我们根据第 2.1 节的调查结果设置了出行者的心理预期值和用户的经验数据。在表 3 中,下标为 0 和 1 的变量分别代表私家车司机和汽车共享用户。我们令 t_u 表示无交通阻塞时的乘车时间, f_u 表示乘私家车出行时最少的燃油花销。 v_n 和 n 是根据调查结果的分布计算出来的。假设所有在同一时间共享同一辆汽车的用户分摊燃油费。

表 4 展示了基于深度模型的交通模式演化的参考参数。下标为 0、1 和 2 的变量分别代表私家车司机、汽

车共享司机和汽车共享乘客.

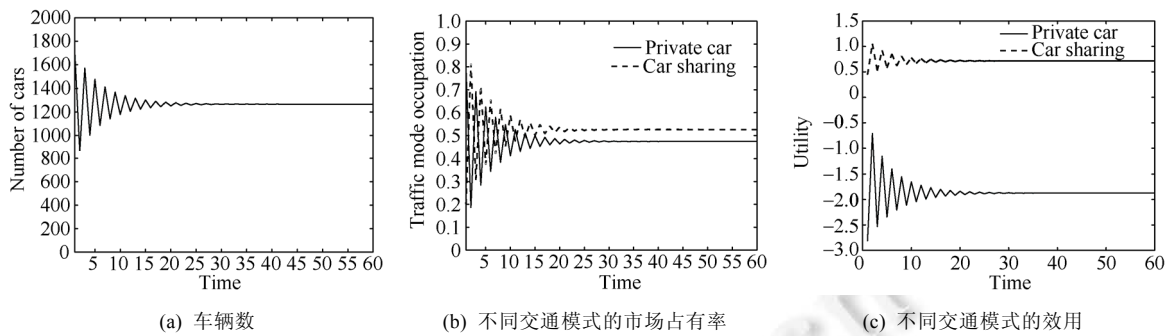


图3 基于基础模型的交通模式演化. $q=2\ 000, P_0=0.8, P_1=0.2$

4.2 仿真结果

首先,由于基础模型的建立是基于一个相对理想的情况,同时调查背景也是同样的情景.所以我们根据调查结果,针对基础模型调整权重参数 α 的取值.假设每位出行者选择交通模式的周期为1天.

4.2.1 基础模型的演化结果

图3展现了基础模型的演化结果.由图3可见,演化在30天左右达到均衡.在均衡状态下,汽车共享的市场占有率比私家车出行的市场占有率略高.此时,选择汽车共享的人的效用始终高于开私家车出行者的效用.由图3(c)可知,当出行者共2000人时,若所有人选择开私家车出行,则出行区域将会有2000辆车;而当汽车共享这一交通模式进入市场且市场达到均衡时,出行区域内的车辆数仅为1267.下面我们来分析各个影响因素对交通模式演化的影响.

表3 参数实验参考值(1)

符号	参考值
v_w	$0.25t_u$
v_r	$1.5t_u$
v_n	3.7
v_f	$\frac{f_u}{n}$
t_w	$t_{w_0} = 0, t_{w_1} = f_w(N)$
t_r	$f_r(N)$
n	$n_0=1, n_1=3.3$
f	$f_0 = f_u, f_1 = \frac{f_u}{n}$

表4 参数实验参考值(2)

符号	参考值
v_c	0.5
t_w	$t_{w_0} = t_{w_1} = 0, t_{w_2} = f_w(N)$
t_r	$t_{r_0} = f_r(N), t_{r_1} = t_{r_2} = \frac{1}{\gamma} \cdot f_r(N)$
n	$n_0 = 1, n_1 = n_2 = \frac{P_2}{P_1}$
f	$f_0 = f_u, f_1 = f_2 = \frac{f_u}{n}$
c	$c_0=0.8, c_1=1, c_2=0$

初始市场配比的影响:我们测试了不同初始市场配比下的演化情况.结果表明,在基础模型的场景中,初始市场配比对市场的演化结果没有影响.

出行者数量的影响:当有出行需求的人的数量小于360人时,如图4所示.

市场配比将会始终维持初始状态;当出行者数量大于360人时,市场将会先振荡,最终稳定下来,并且随着出行者数量的增加,收敛速度变慢,汽车共享的最终市场占有率也变大,最大值达到接近0.64,与调查结果相吻合;当出行者数量达到8496时,交通模式的演化将永远处于振荡状态,无法达到均衡;当出行者数量达到8496时,演化结果回到均衡状态,且此时,所有出行者选择共享汽车出行.除此之外,我们验证了在不同的出行者数量 q 的情况下,初始市场配比都不会影响演化结果.

总的来说,在不考虑出行者路线重合度及司机额外花销的情况下,更多的人愿意选择汽车共享.

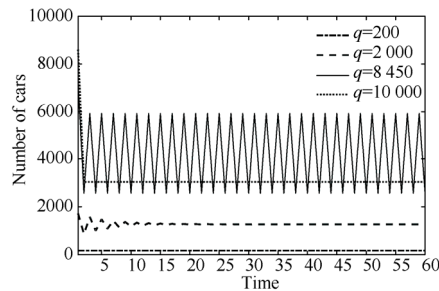


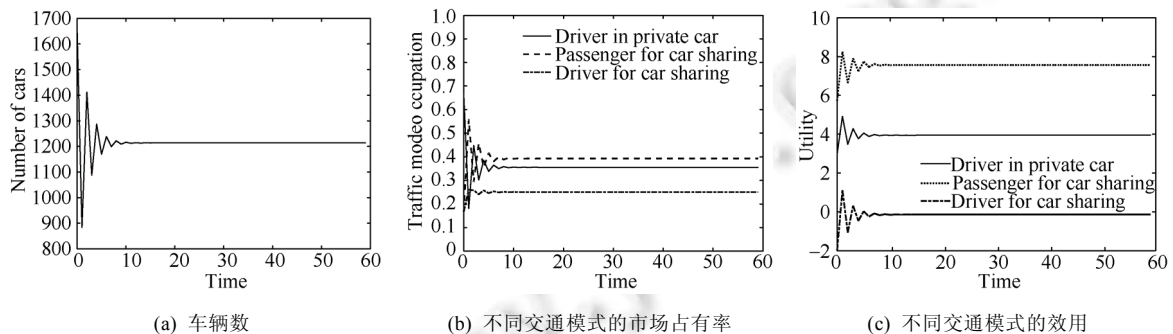
图4 不同出行需求下,基于基础模型的车辆数演化

4.2.2 深度模型的演化结果

图5展示了深度模型演化的结果.与基础模型的演化结果相比,深度模型演化达到均衡所用的时间更短,在10天以内.最终有36%的出行者开私家车出行,25%的出行者作为汽车共享的司机出行,还有39%的出行者作为汽车共享的乘客出行.此结果与调查结果相契合,说明了此模型的合理性.但在演化达到均衡时,平均每辆共享的汽车中有2.6人,这比实际愿意参加汽车共享的人平均能接受的车内人数要少.这表明,我们可以通过鼓励更多的人成为汽车共享的乘客,以提高汽车资源利用率.图5(c)表明,与另外两种角色相比,汽车共享的司机所获得的效用是最低的,同时,汽车共享的乘客获得的效用最高.当市场达到均衡状态时,出行区域共有1214辆车.下面我们来分析在深度模型的应用中,各个因素对交通模式演化的影响.

初始市场配比的影响:与基础模型的实验相同,我们测试了初始市场配比对演化的影响.结果与在基础模型中相同,初始市场配比对市场交通模式的演化结果没有影响.

出行者数量的影响:我们首先测试了当 $\gamma=0.7$ 时,出行者数量对演化的影响.如果出行者数量小于250人,如图6(a)所示,则多数出行者会选择开私家车,并且私家车数量在某一时刻会有突然的增长,以致没有人进行汽车共享,从开始到最后私家车成为唯一交通模式的整个过程将消耗一年半的时间;当出行者数量在250人~490人之间时,演化将如图6(b)所示,陷入无穷无尽的振荡中,永远无法达到均衡状态;当出行者数量多于490人时,演化最终会收敛到一个稳定的状态,如图6(c)所示,且此收敛过程在20天以内.我们也测试了当 γ 取不同值时,出行者数量对演化的影响.结果表明,无论 γ 取何值,演化随出行者数量变化所产生的改变都分为上述3种情况:当出行者数量小于一定数值时,市场最终只有私家车一种模式;当出行者数量增加至某一区间内时,演化结果将永远振荡,无法收敛;当出行者数量到达一定数值时,出行市场的交通模式最终将达到一个稳定的状态.

图5 基于深度模型的交通模式演化. $q=2000, P_0=\frac{2}{3}, P_1=P_2=\frac{1}{6}, \gamma=0.7$

聚集系数的影响:假设某固定区域出行者的数量为2000人,我们研究出行需求聚集度将如何影响交通模式的演化.结果如图7所示:当 $\gamma \leq 0.7$ 时,交通模式最终会演化为稳定状态,并且此时, γ 越大,收敛速度越快,汽车共享的参与者越多,共享汽车的乘客获得的效用越大,乘私家车出行的人获得的效用越小;当 $0.7 < \gamma < 0.9$ 时,演化将持续振荡,无法达到稳定状态,而此时,共享汽车的乘客的效用总是比其他两种交通模式的用户的效用要高;当 γ

≥ 0.9 时,将无人乘私家车出行,车辆共享的乘客与司机之比约为 7:3.随着 γ 的增大,共享汽车的司机增多,相关路段上车辆数也小幅增加.

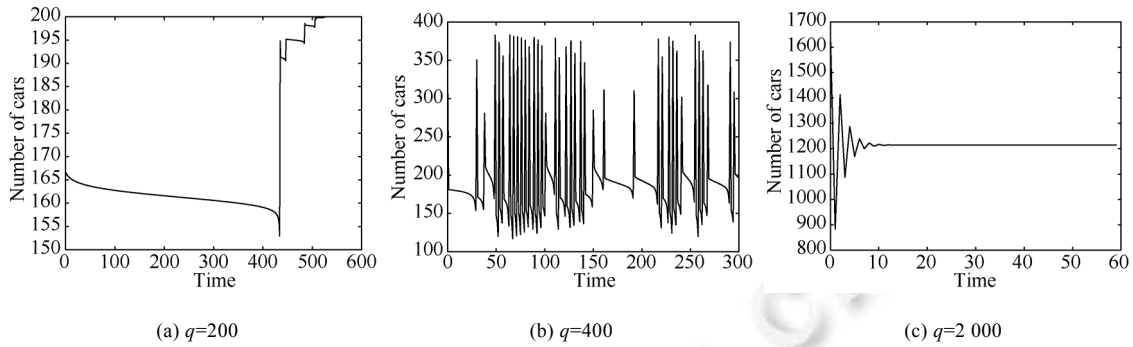


图 6 不同出行需求下,基于深度模型的相关路段车辆数演化

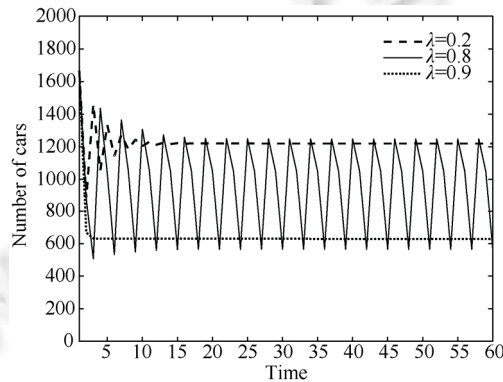


图 7 不同交通需求聚集度下,基于深度模型的车辆数演化

4.2.3 真实出行数据的演化结果

我们提取出每天 7:00~8:00 以及 17:00~18:00 的订单数量,涵盖 31 天,共 62 组数据.假设出行者每日分别在上述两个时间段出行,并分别做出行模式的选择决策.我们将订单数量作为出行需求,设定 $\gamma=0.7$,实验并观察了交通模式的演化.结果如图 8 所示,汽车共享和私家车这两种交通模式并存.

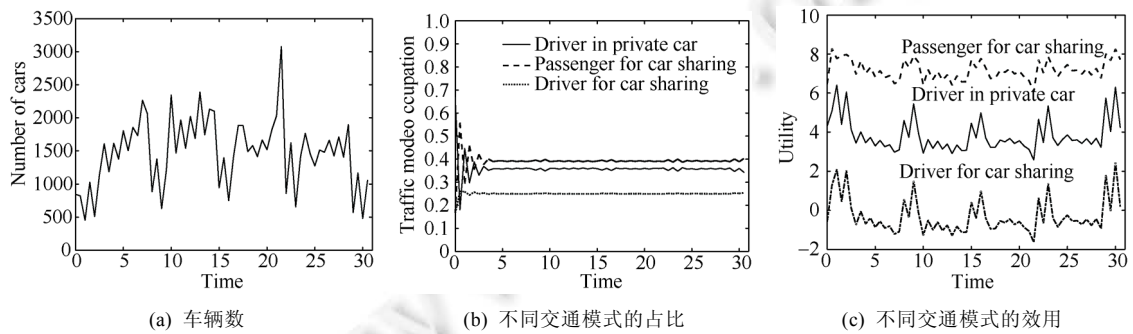


图 8 基于真实出行需求的交通模式演化

图 8(a)和图 8(c)表明,在真实出行需求的推动下,路上的车辆数及各类出行者的效用都不能达到一个稳定状态;图 8(b)显示,在不同类型的出行者中,汽车共享的乘客占比最高,其次是私家车司机.汽车共享的司机获

得的效用最低,占比也最小.也就是说,出行需求的变化带来了不稳定性因素.目前,若要在北京范围内实行汽车共享,且不加入经济因素或政策干预,交通模式将无法达到稳定状态.

5 总结

本文工作探索了交通模式的演化过程,考虑了乘私家车出行及共享汽车出行两种交通模式.我们基于真实数据,对出行需求进行测量,验证了汽车共享的可行性;基于计量经济学中的 Logit 模型,建立数学模型以描述不同交通模式下的出行者体验和汽车资源利用率.同时,我们利用真实数据和调查问卷的结果使模型更加符合实际情况.进而,基于建立的数学模型,我们通过实验来观察交通模式的演化过程及结果,并分析影响演化的因素.实验结果表明,初始市场配比并不影响交通模式的演化结果,聚集系数和交通需求量(即出行者数量)深刻地影响了演化过程及结果.最后,我们利用真实的出行需求数据,实验并分析了交通模式的演化.

目前看来,车辆共享还有很大的发展空间.我们应完善相应法制建设,采取鼓励措施,使更多的出行者加入到汽车共享的行列.在未来的研究和实践中,可以尝试通过价格策略或其他政策来鼓励车辆共享,以提高汽车资源的利用率.

References:

- [1] Hamari J, Sjöklint M, Ukkonen A. The sharing economy: Why people participate in collaborative consumption. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2015. [doi: 10.1002/asi.23552]
- [2] Zhang DS, Huang J, Li Y, Zhang F, Xu CZ, He T. Exploring human mobility with multi-source data at extremely large metropolitan scales. In: *Proc. of the 20th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. Hawaii, 2014. 201–212.
- [3] Giannotti F, Nanni M, Pedreschi D, Pinelli F, Renso C, Rinzivillo S, Trasarti R. Unveiling the complexity of human mobility by querying and mining massive trajectory data. *VLDB Journal*, 2011,20(5):695–719.
- [4] Isaacman S, Becker R, Cceres R, Martonosi M, Rowland J, Varshavsky A, Willinger W. Human mobility modeling at metropolitan scales. In: *Proc. of the 10th Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services*. Low Wood Bay, 2012. 239–252.
- [5] Buch N, Velastin SA, Orwell J. A review of computer vision techniques for the analysis of urban traffic. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2011,12(3):920–939.
- [6] Besanko D, Gupta S, Jain D. Logit demand estimation under competitive pricing behavior: An equilibrium framework. *Management Science*, 1998,44(11):1533–1547.
- [7] Valancius V, Lumezanu C, Feamster N, Johari R, Vazirani VV. How many tiers? Pricing in the Internet transit market. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM 2011 Conf. Toronto*, 2011. 194–205.



付瑶(1992—),女,黑龙江大庆人,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为网络经济学,共享经济,数据定价.



苏辉(1977—),男,博士,CCF 学生会员,主要研究领域为计算机网络,网络经济学.



徐恪(1974—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为网络体系结构,高性能路由器,P2P 网络,物联网,网络经济学.