

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2022.09.003

# 汽车分时租赁下消费者出行模式选择行为分析<sup>①</sup>

万湓宇<sup>1</sup>, 柳 键<sup>2\*</sup>, 程永生<sup>3</sup>, 罗春林<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学交通运输与物流学院, 南昌 330013; 2. 江西财经大学信息管理学院, 南昌 330032; 3. 江西财经大学工商管理学院, 南昌 330032)

**摘要:** 从消费者行为视角, 探讨汽车分时租赁、网约车与私家车三种出行模式之间关系. 利用最优停止理论刻画消费者在三种出行模式间的最优选择行为. 通过个体的最优行为推导总体均衡, 并分析分时租赁模式中合并效应存在的条件. 研究发现, 行驶里程的不确定性会延迟消费者购车决策, 所以在私家车更划算的行驶里程范围内, 消费者仍会选择网约车和分时租赁. 网约车对分时租赁存在竞争效应和延迟效应. 当网约车与分时租赁价格差距较大时, 消费者间出行选择行为存在均衡. 该均衡决定了分时租赁与其他出行模式为互补共存关系, 这也限制了分时租赁的发展: 分时租赁总是适于中等里程且临时性的出行, 这制约分时租赁汽车的利用率. 合并效应的存在条件与分时租赁系统的服务率和服务时间稳定性有关, 车辆规模并不是合并效应存在的必要条件.

**关键词:** 最优停止; 分时租赁; 商业模式; 消费者行为; 交易成本

**中图分类号:** F274      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2022)09-0032-20

## 0 引言

根据2017年国家交通运输部发布的《关于促进汽车租赁业健康发展的指导意见》, 汽车分时租赁(也称汽车共享), 是以分钟或小时等为计价单位, 利用网络服务平台, 为用户提供自助式车辆预定、车辆取还、费用结算为主要方式的汽车租赁服务. 根据艾瑞咨询公司《2019年中国分时租赁行业研究报告》(后称艾瑞报告), 截至2019年2月, 中国已注册的共享汽车企业及单位超过1600家, 投入运营的汽车数量达到11万辆~13万辆, 整体市场规模达28.5亿元. 同时各级政府部门纷纷出台分时租赁的鼓励政策, 如交通运输部、住房城乡建设部联合发布了《关于促进小微型客车租赁健康发展的指导意见》, 明确鼓励分时租赁发展, 而北京、上海、武汉、成都和深圳等

城市均明确表示支持的态度. 因此, 分时租赁模式作为一种新的出行方式正在逐步得到重视.

然而, 汽车分时租赁模式的发展仍存在隐忧. 2018年初分时租赁品牌TOGO刚获得2600万元融资, 同年9月即传出全面撤离南京的消息. Car2go、EZZY等分时租赁品牌也纷纷退出国内市场. 企业更替也许还不能完全说明问题, 从具体关键运营数据来看也并不乐观. 2019年初分时租赁平台EVCARD投入车辆规模为4.2万辆, 日订单量接近10万([www.iyiou.com/p/89549](http://www.iyiou.com/p/89549)), 这说明每辆车每天平均被使用2.4次, 而70%分时租赁汽车单次使用时长在1h以内(EVCARD《2018分时租人群大数据报告》, 简称EVCARD报告); 根据GoFun分时租赁平台公布数据, 其单辆车日订单量为3.5万(<https://36kr.com/newsflashes/117040>). EVCARD和GoFun是活跃用户排名靠

<sup>①</sup> 收稿日期: 2020-04-19; 修订日期: 2021-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72162018; 71961008; 71961009; 72261013; 71862014); 江西省教育厅科技项目(GJJ190266).

通讯作者: 柳 键(1964—), 男, 湖南浏阳人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: liujian3816@263.net

前的分时租赁品牌,两企业数据具有代表性。明显地,分时租赁汽车的平均使用次数偏少。使用次数不仅是企业关键运营指标,也体现了分时租赁模式的社会价值,如车辆利用率。基于以上观察,从消费者行为视角,研究分时租赁与其他汽车出行模式间关系,从而探讨分时租赁车辆使用次数偏低的原因。由于网约车与私家车出行是当前主流汽车出行方式,故以此为背景,具体研究问题如下:1) 分析消费者汽车出行选择行为的基本机理,探讨分时租赁与网约车、私家车出行模式的关系;2) 分析消费者间汽车出行选择的均衡,探讨分时租赁模式存在合并效应的条件。其中,合并效应(pooling effect)是由于资源共享所带来的资源所需数量减少的效应<sup>[1-3]</sup>,该效应反映了分时租赁的“共享”特征,其程度能够反映车辆使用次数和利用率<sup>②</sup>。

为了研究以上问题,必须先分析消费者汽车出行行为的关键特征:1) 即使私家车更划算,消费者也会选择分时租赁与网约车。根据艾瑞报告,出行里程在30 km之内时,分时租赁出行相对于私家车具有明显成本优势,超过该范围私家车出行更划算。但根据EVCARD报告,25%的分时租赁订单超过30 km<sup>③</sup>;网约车出行成本明显高于私家车,但大量用户仍采用网约车出行。2) 网约车与分时租赁的出行里程具有明显的分层关系。根据EVCARD报告,90%用户订单出行里程在50 km以内,其中10 km以内比例为31%。根据36kr研究院《2018 网约车用户调研报告》(后称36kr报告),72%的网约车出行订单集中于10 km以内。前一特征反映了购车出行(即私家车出行)与租车出行(即分时租赁与网约车)之间关系,后一特征反映了分时租赁与网约车之间关系。研究从用车需求不确定性和消费者出行行为均衡的视

角解释上述两个现象<sup>④</sup>。

具体来说,首先,购车与租车关键区别在于所有权。购车模式下消费者必须购买所有权,而租车仅按需购买使用权,这决定了出行模式的灵活性。在用车需求不确定的情况下,若选择不灵活的购车出行,消费者必须承担未来用车需求下降的风险,而租车则能帮助消费者避免该风险。比如,在需求不稳定时消费者先租车并等待到用车需求稳定再决定是否购车。所以,在需求不确定时,租车的灵活性给消费者带来了额外的价值(即避免不确定性风险)。所以私家车出行成本更划算时,消费者也会选择租车。其次,网约车与分时租赁关键区别在于司机。司机的存在影响网约车与分时租赁相对价格关系,从而影响消费者出行选择的均衡:价格更高的网约车必然会有更低的均衡交易成本。这决定两者行驶里程分层关系。

由上述分析,租车与购车间的选择实际上是一个最优停止问题,其中租车对应于等待决策,购车对应于停止决策,而网约车与分时租赁的区别则反映在租车决策的效用中。利用行驶里程的不确定性描述用车需求的不确定性,构建了消费者在网约车、分时租赁与购车间选择的最优停止模型,并通过合并效应讨论车辆利用率的问题。首先,研究消费者个体的最优出行决策;其次,依据个体行为,研究消费者出行决策的均衡并探讨三种汽车出行模式的关系;最后,依据均衡,推导分时租赁存在合并效应的条件。

## 1 文献综述

从两个方面进行综述:分时租赁相关研究和最优停止理论在消费者行为中的相关研究。

1) 分时租赁模式相关研究: Gilbert 等<sup>[4]</sup>研究

② 汽车分时租赁中,该效应实际上是将消费者的用车需求合并起来,从而用少量的车集中满足所有人的需求,因此,本文译为合并效应。合并效应的存在说明单位时间内一辆车被多人使用,故合并效应越大,车辆使用次数越多。合并效应并不只存在于理论:TOGO发布的《中国一线城市共享汽车出行分析报告》指出,在北京地区共享汽车平均使用频次为5.1,并且曾在一天内一辆车被5个人使用了7次([http://www.sohu.com/a/143119006\\_118021](http://www.sohu.com/a/143119006_118021))。

③ 虽然超过30 km的订单少于30 km内订单,然而,中长里程的出行在全部出行中所占比例本身就小。根据高德大数据《2017Q1 中国主要城市交通分析报告》,超过20 km的出行仅占全部出行的比例为25%左右。相比之下,分时租赁超过30 km的订单达到25%已经是较大的比例了。

④ 本文视角并不是唯一视角。比如第一特征可以用预算约束来解释,但车贷使得消费者的预算约束越来越放松,其解释力较弱(文献[27]也持该观点)。第二特征可解释为网约车单价高,但该视角不全面,没考虑交易成本。同时本文视角与以上视角并不冲突,所以不影响本文视角的理论与现实意义,且本文视角下的结论与现实观察相吻合。

发现分时租赁模式作为企业对消费者价格歧视的手段,与销售模式存在差别.销售模式下企业更愿意针对消费者的使用频率进行价格歧视,而分时租赁模式下企业更愿意针对高低端消费者进行价格歧视. Balasubramanian 等<sup>[5]</sup>对信息产品中的商业模式选择问题进行分析,发现交易成本较低使得使用支付机制( pay-per-use mechanisms) 对企业更有利. Bellos 等<sup>[1]</sup>研究了汽车分时租赁中产品线设计问题,发现分时租赁能够缓解同品牌产品间竞争. Yu 等<sup>[2]</sup>考虑市场纵向细分下销售和分时租赁模式的定价问题,发现在一定条件下分时租赁能够得到更高的利润. Abouee 等<sup>[6]</sup>研究了共享模式中新能源汽车采用问题,发现充电站数量、充电速度等因素对新能源汽车的采用决策至关重要. 除以上文献之外,服务化和 P2P 共享的文献也与分时租赁有关. Agrawal 等<sup>[3]</sup>和 Örsdemir 等<sup>[7]</sup>探讨了制造企业服务化是否能够实现企业与环境双赢的问题,两篇文献的服务化模型中都考虑企业拥有产品同时消费者按照使用支付租赁价格( pay-per-use),这与分时租赁的特征是一致的. 文献[1-3]中将合并效应作为分时租赁和服务化的关键特征. Jiang 等<sup>[8]</sup>、Tian 等<sup>[9]</sup>和 Benjaafar 等<sup>[10]</sup>对 P2P 共享问题进行了研究, P2P 共享与分时租赁的区别在于, P2P 是消费者间的共享. 分时租赁在国内也受到一定关注. 吕通等<sup>[11]</sup>考虑存在网络效应的情况下,共享汽车网络布局的问题. 黄毅祥等<sup>[12, 13]</sup>研究了分时租赁模式下竞争演化和联盟定价的问题,发现企业在分时租赁模式中扩大市场份额的企图容易引发价格战,而分时租赁企业与电力公司之间的联盟则能带来更高收益. 上述研究没有深入刻画商业模式变化对消费者微观行为的影响,其构建的消费者模型并不能解释引言中消费者出行行为特征,故与现实存在差距.

2) 最优停止理论在消费者行为中的相关研究: 在日常生活中,消费者在购买产品时会遇到不确定性的风险,比如买完东西后发现更便宜的产品或者购买之后对产品并不满意. 为了避免以上情况,消费者在购买前会收集足够的信息,但信息的收集存在成本,故最优停止点( 停止收集信息并购买) 是消费者决策的关键. Branco 等<sup>[14]</sup>考虑

产品对消费者效用不确定的情况下,消费者最优购买决策的问题. 发现消费者最佳购买时机与搜索成本成反比,而与信息间差异成正比. Ke 等<sup>[15]</sup>将文献[14]的模型扩展到多产品的情况,发现在多产品的情况下,消费者最优购买时机与产品间效用差异有关. Ke 等<sup>[16]</sup>研究了最优信息学习策略问题,其研究结论可以应用于消费者购买行为. 在出行行为方面,由于购车仅仅是购买行为的特例,因此也能使用最优停止理论. De Lapparent 等<sup>[17]</sup>、Cirillo 等<sup>[18]</sup>和 Liu 等<sup>[19]</sup>均采用最优停止理论研究消费者私家车购买决策问题. 这些研究主要集中在销售模式框架下,而本研究拓展到了分时租赁模式,基于最优停止理论研究了消费者出行行为. 此外,徐淑贤等<sup>[20]</sup>、徐薇等<sup>[21]</sup>深入刻画了消费者出行选择行为的自驾偏好、双目标等特征,研究了城市系统均衡和交通流演化等问题,其研究范式值得借鉴.

综上,由于汽车价值高且使用时间长,购车与其他出行模式间选择具有投资决策的特征,故最优停止的分析框架常被采用<sup>[17-19]</sup>. 而以往分时租赁文献较少针对汽车出行领域,故对该特征有所忽略. 这造成了两类文献间的空白地带,即较少文献深入研究分时租赁下的消费者出行选择行为. 其结果是,现实出行数据中消费者出行特征无法在分时租赁的文献中找到理论支撑,而支撑这些数据的理论又没有考虑分时租赁模式. 研究填补这一空缺,其结论得到了消费者行为实际数据的印证. 具体来说,与以往文献区别在于: 深入刻画了汽车出行中的个体消费者行为,这有利于构建分时租赁理论的微观基础; 探讨消费者出行选择行为的总体均衡,解释了分时租赁、网约车与私家车出行间关系形成的机理,并定性地阐述了三种出行模式基本关系; 合并效应是分时租赁关键特征的直接反映,但较少被深入讨论,研究从消费者行为角度内生地研究该效应.

## 2 模型设计与假设

假设在线性城市中,消费者存在使用汽车出行的需求,比如通勤用车需求、出游用车需求等. 由于生活中用车的原因、目的等存在不确定性和

外生性,这导致消费者的用车需求具有外生性和不确定性. 比如,通勤用车需求受到工作变动、工作地点变动等不确定且外生因素的影响,日常生活中也常存在意料之外的出行需求. 该假设常见于相关文献中<sup>[17-19]</sup>. 消费者用车需求的不确定性可以细分为多个方面,但由于相关机构研报及数据多与行驶里程有关,为了与数据保持一致并兼顾模型可处理性,利用行驶里程的不确定性描述用车需求的不确定性. 以往研究文献也常采用行驶里程刻画消费者用车需求或效用<sup>[17, 22, 23]</sup>. 设  $l_t$  表示消费者第  $t$  次使用汽车的行驶里程,假设消费者每次用车的行驶里程以等概率增大或缩小  $y$  的幅度,即  $|l_{t+1} - l_t| = y$ .  $y$  是外生给定的,行驶里程的变化幅度  $y$  反映了消费者行驶里程不确定性的影响程度,也反映了用车需求的稳定性. 通过调整  $y$  的取值,模型可以描述不同出行场景的出行需求,比如通勤场景下行驶里程变化幅度较小,此时  $y$  相应较小.

假设消费者可以选择使用分时租赁汽车、网约车和购买私家车来实现汽车使用的需求. 不单独考虑传统出租车. 虽然网约车与出租车存在区别,但是从消费者的角度两者服务存在同质性. 根据比达咨询《2018年中国出租车 & 网约车出行用户调研报告》,90%的用户认为网约车是出租车的升级服务,而且相对于出租车,80%以上的用户更青睐网约车,这说明两者存在明显的替代性. 设  $v$  表示消费者使用汽车时每 km 的支付意愿(即保留价格). 该参数是一些外生因素的综合反映,比如,消费能力、出行重要性等. 消费者使用分时租赁时每 km 支付价格  $p$ ,并设  $v > p$ . 消费者使用分时租赁时必须承担交易成本  $c$ . 虽然如今由信息不畅而产生的交易成本大大降低,但消费者间摩擦仍产生交易成本. 假设分时租赁交易成本是消费者排队等待服务的时间成本. 该假设的合理性在于: 首先,等待时间成本能够反映消费者间摩擦的基本特征,即随着参与人数增加,人与人之间的摩擦成本增加;其次,排队等待时间成本是为完成交易所需支付的额外成本,故属于交易成本;最后,分时租赁与共享的文献常将分时租赁系统考虑为一个排队系统,这是能够反映现实的常用假

设<sup>[1, 10]</sup>. 根据上述,具体假设如下,将城市中的分时租赁服务系统看作整体,消费者需要排队使用分时租赁汽车. 利用  $M/G/1$  排队模型描述交易成本,消费者平均等待时间满足<sup>[24]</sup>

$$W = \frac{\lambda(1 + \gamma^2)}{2\mu(\mu - \lambda)} \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为到达率,其含义是单位时间平均达到人数. 假设到达率与参与人数  $m$  呈正相关关系,即  $\lambda = km$ . 由于到达率也反映了消费者间的摩擦程度,比如,若大部分消费者在相同时段使用分时租赁,那么单位时间到达率较高,消费者间摩擦程度也较高,故将系数  $k$  称为消费者摩擦系数.  $\mu$  表示服务率,即单位时间完成服务的人数. 假设  $\mu$  是系统中车辆数  $n$  的函数,随着车辆数增加,服务率增大.  $\gamma$  是系统服务时间的变异系数,该系数反映服务时间的稳定性. 由于仅考虑排队时间造成的交易成本,故  $c = W$ . 关于排队模型的假设,有几点值得说明: 1) 分时租赁系统可以看作是多服务台的排队系统(即将一个取车点看作服务台),也可以看作单服务台(即将分时租赁系统看作一个整体). 为了深入刻画交易成本并兼顾可处理性,采取后者. 类似地,文献[10]也使用单服务台模型近似处理多服务台问题. 2) 假设消费者到达过程服从泊松分布,这是一个常用的简化. 此假设并不会与前文行驶里程的随机变化相矛盾,因为行驶里程的随机性假设中仅规定了消费者每次用车的行驶里程变化,并没有规定消费者每次到达系统的时间间隔,故两个随机变量互不干扰. 3) 仅在排队系统存在稳态时讨论等待时间,故假设  $\lambda < \mu$ <sup>[24]</sup>. 若  $\lambda \geq \mu$ ,等待时间趋于无穷,没有讨论的意义. 结合以上,一个消费者使用一次分时租赁汽车的净效用为

$$u = (v - p) |l_t| - c \quad (2)$$

假设网约车单价为  $h$ . 由于网约车要支付司机工资,故假设网约车的价格要高于分时租赁价格,即  $h > p$ . 这是符合现实的,以南昌出行费用为例,根据南昌滴滴计价规则,滴滴快车道费最低为 2 元/km,时长费最低 0.35 元/min;而南昌分时租赁的价格(以联动云为例),消费者租赁一辆观致 5 车型的里程费用为 1.1 元/km,时长费 0.2 元/min;而 Gofun 出行的价格则低至 1 元以

下. 假设网约车用户间摩擦同样会产生交易成本为  $c_h$ , 利用  $M/G/1$  排队模型描述网约车交易成本. 令  $\mu_h$  和  $\gamma_h$  表示网约车系统的服务率与服务时间变异系数, 其等待时间如式 (1). 交易成本是由消费者行为内生决定的, 但此处不妨先假设分时租赁交易成本高于网约车交易成本, 即  $c > c_h$ , 后文再证明这一点 (附录 3). 由于网约车也是按照里程付费, 故其净效用为

$$u_h = (v - h) |l_t| - c_h \quad (3)$$

观察式 (2) 和式 (3), 网约车和分时租赁均是按照里程购买使用权的出行服务, 该共性决定两者竞争关系. 但两者价格和交易成本的差别反映了服务模式的关键区别 (如引言所述), 这也将决定两者关系. 假设消费者购买汽车时需要支付销售价格  $f$ , 当汽车每行驶 1km, 消费者需承担使用成本  $c_v$  (比如油费和保养费用). 由此得到消费者购买汽车所获得的净效用为

$$u_b = (v - c_v) \sum_{t=1}^N |l_t| - f \quad (4)$$

其中  $N$  表示汽车的耐久性 (即假设每辆汽车可以使用  $N$  次). 由于分时租赁和网约车下运营要弥补油费和保养成本, 所以  $h > p > c_v$ . 使用成本  $c_v$  和销售价格  $f$  共同表示持有成本. 观察式 (2) ~ 式 (4) 可知, 若消费者采用分时租赁或网约车就必须承担交易成本, 而购买汽车则必须承担持有成本. 因此, 上述模型不仅刻画了购车与租车在灵活性上的区别 (购车需一次性购买  $N$  期的服务), 还体现了所有权差异造成的成本差异. 另外, 若消费者行驶里程足够长, 购买汽车必然好于分时租赁和网约车 (因为后者斜率更大). 这说明随着行驶里程变长, 购车出行将更加划算, 这与引言中所描述的实际情况相吻合.

假设每个消费者个体行驶里程呈现随机性, 但总体行驶里程分布呈现稳定性. 虽然前文对消费者行驶里程的变化做了随机性假设, 但城市是复杂系统, 其总体行驶里程分布受许多外生因素影响, 比如, 城市人口流动等. 若仅从个体的假设推断总体的分布, 这忽略了外生变量的影响, 从而影响结论的可用性. 根据高德大数据《2017Q1 中国主要城市交通分析报告》(后称高德报告) 显示, 2016 年与 2017 年相比, 北京和上海机动车行

驶里程比例总体分布较为稳定, 其最大变化幅度不到 4%. 这说明虽然每个消费者每天出行里程在变化, 但总体的分布是相对稳定的. 因此, 假设由于人口流动等外生原因, 消费者总体的行驶里程分布具有稳定性. 假设消费者每期总体行驶里程的分布服从一般分布  $G(l)$ , 其密度函数为  $g(l)$ . 考虑的行驶里程分布, 是指分时租赁系统中每期参与决策的人员的行驶里程分布. 由于人员流动等外生原因, 系统中参与决策的人员会发生变化, 所以总体分布保持稳定与具体某人行驶里程随时间变化的假设不矛盾.

为了简化求解过程, 对消费者行驶里程的变化过程做连续化处理 (类似文献 [14]). 虽然汽车的使用是离散的, 但每次使用的间隔相对较短. 利用文献 [14] 相同的方法, 将较短的用车间隔近似为连续变化, 令  $\sigma = y \sqrt{dt}$ , 可得行驶里程符合如下随机过程

$$dl = \sigma dw \quad (5)$$

其中  $dw$  是标准布朗运动,  $\sigma$  表示行驶里程变化的幅度.

### 3 单个消费者的出行选择行为分析

将网约车与分时租赁称为租车, 私家车出行称为购车. 对于单个消费者而言, 其决策中基本的矛盾在于当期效用与未来效用的平衡, 最优停止理论恰好能够描述该基本矛盾. 具体来说, 消费者选择租车既是为了获得租车的服务, 也是行使等待的权利 (等待最优购车时机), 而购车则是停止等待 (即停止租车). 消费者通过决策最优停止时机实现自身效用最大化.

为了构建该最优停止模型, 并具体解释模型刻画的基本矛盾, 必须分析消费者在租车与购车间的得失. 从当期效用看, 消费者选择租车时, 能够得到租车本身带来的效用, 但是失去了当期立即使用私家车的机会 (当期租车即是放弃当期立即购车). 从未来效用看, 消费者选择租车即是行使了等待的权利. 由于私家车价值 (即使用私家车获得的总效用) 随行驶里程变化, 故等待的权利帮助消费者保留了获得更大私家车价值的机

会. 在出行决策中, 当期效用与未来效用存在取舍关系. 比如, 设想消费者行驶里程逐渐增大, 此时若选择租车, 消费者必须承担当期效用损失(因行驶里程较大时, 私家车比租车更划算), 但未来私家车价值可能上升. 若选择购车, 消费者则放弃了未来私家车价值上升的可能, 但是避免了当期损失. 该主要矛盾虽然没有直接的消费者心态等数据支撑, 但上述矛盾的取舍必然使消费者行为表现出“等待特定时机购车”的特征(若仅考虑当期效用, 消费者会在私家车划算时立即购车). 根据艾瑞咨询发布的《2017 年中国首购车用户营销研究报告》, 78.9% 的消费者选择婚后首次购车, 52.1% 的消费者选择事业处在小有成就的时机购车, 这说明消费者普遍在等待特定时机购车. 由以上分析, 构造单个消费者的最优停止问题如下

$$V(l) = \max\{\Omega(l), \pi(l) + EV(l + d l)\} \quad (6)$$

其中  $V(l)$  表示价值函数(即消费者能够得到的最大效用).  $\Omega(l)$  为终止价值(即私家车价值), 反映了消费者选择购买私家车时, 未来能够得到的预期效用. 由于布朗运动的特点( $E(d l) = 0$ ),  $\Omega(l) = N(v - c_v) |l| - f \times \pi(l)$ , 表示当期效用的比较, 根据式(2) ~ 式(4),  $\pi(l) = \max\{(v - p) |l| - c, (v - h) |l| - c_h\} - (v - c_v) |l| + f/N$ , 其中  $(v - p) |l| - c$  是消费者使用分时租赁的当期效用,  $(v - h) |l| - c_h$  是使用网约车的当期效用,  $(v - c_v) |l| - f/N$  表示若当期立即购车, 消费者使用私家车能得到的当期效用. 由于在租车时, 消费者会选择分时租赁和网约车中效用较大的出行模式, 故  $\max$  函数反映了分时租赁与网约车的竞争关系. 由于选择租车即放弃当期购车, 所以  $(v - c_v) |l| - f/N$  是机会成本.  $EV(l + d l)$  表示当期选择租车的情况下, 消费者在未来所能得到的最大效用. 根据上述, 最优停止模型很好地刻画了消费者决策中基本的矛盾:  $\pi(l)$  反映了当期效用的比较, 而  $EV(l + d l)$  与  $\Omega(l)$  的比较反映了未来效用的比较. 根据式(6)以及文献[14, 25, 26], 消费者当期选择租车的价值函数如下

$$V(l) = \pi(l) d t + EV(l + d l) \quad (7)$$

对  $EV(l + d l)$  进行泰勒展开并利用伊藤引理可以得到

$$V(l) = \left( \max\{(v - p) |l| - c, (v - h) |l| - c_h\} - (v - c_v) |l| + \frac{f}{N} \right) d t + \left( V(l) + V'(l) E(d l) + V''(l) \frac{E(d l^2)}{2} \right) \quad (8)$$

对其中分段函数的部分进行分析, 可得下式

$$\pi(l) =$$

$$\begin{cases} (v - h) |l| - c_h - (v - c_v) |l| + f/N, & |l| \leq \frac{c - c_h}{h - p} \\ (v - p) |l| - c - (v - c_v) |l| + f/N, & |l| > \frac{c - c_h}{h - p} \end{cases} \quad (9)$$

该式的含义是, 若消费者当期决定租车, 那么当行驶里程小于  $\frac{c - c_h}{h - p}$ , 消费者会选择网约车, 反之则选择分时租赁. 将式(9)代入式(8), 又由于  $E(d l) = 0$  和  $E(d l^2) = \sigma^2 d t$ , 化简可以得到

$$V'(l) =$$

$$\begin{cases} 2 \frac{(h - c_v) |l| - c_h + f/N}{\sigma^2}, & |l| \leq \frac{c - c_h}{h - p} \\ 2 \frac{(p - c_v) |l| - c + f/N}{\sigma^2}, & |l| > \frac{c - c_h}{h - p} \end{cases} \quad (10)$$

求解微分方程(10)可得到微分方程的解. 由于式(8)仅与行驶路程  $|l|$  有关, 价值函数必然存在对称性, 即  $V(l) = V(-l)$ , 可得

$$V(l) =$$

$$\begin{cases} \frac{(h - c_v) |l|^3 + 3 |l|^2 (c_h - f/N)}{3\sigma^2} + C_1 |l| + C_2, & |l| \leq \frac{c - c_h}{h - p} \\ \frac{(p - c_v) |l|^3 + 3 |l|^2 (c - f/N)}{3\sigma^2} + C_3 |l| + C_4, & |l| > \frac{c - c_h}{h - p} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)即是消费者选择分时租赁时的价值函数. 根据式(2) ~ 式(4)可知, 随着行驶里程逐渐增大, 购车会变得越来越有利, 而租车会越来越不利. 根据文献[26], 消费者不会一直选择租车, 此

时存在一个临界点  $|\Delta|$ , 当  $|l| < |\Delta|$  时, 消费者选择租车, 当  $|l| \geq |\Delta|$  时, 选择购车. 后文简称  $|\Delta|$  为临界里程, 行驶里程达到临界里程的时机即是最优购车时机. 该点必须满足价值匹配 (value matching) 和平滑粘贴 (smooth pasting) 两个条件. 两条件的含义是, 消费者选择租车和购车所能得到的最大效用, 不仅在临界点处要相等 (价值匹配条件), 而且在临界点的足够小的邻域内也要相等 (平滑粘贴条件), 平滑粘贴具体证明详见文献 [26]. 根据模型, 可以得到价值匹配条件

$$V(\Delta) = \Omega(\Delta) \quad (12)$$

该条件保证临界点处两效用相等. 平滑粘贴条件如下

$$V'(\Delta) = \Omega'(\Delta) = N(v - c_v) \quad (13)$$

根据上述定解条件求解微分方程可得

**命题 1** (1) 若  $N(v - c_v) \leq V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)$ , 消费者的最优策略是, 行驶里程较短时使用网约车, 当行驶里程超过  $|\Delta_h|$  时选择购车; (2) 若  $N(v - c_v) > V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)$ , 消费者的最优策略是, 当行驶里程较短 (即  $|l| \leq \frac{c - c_h}{h - p}$ ) 时选择网约车, 当行驶里程中等 (即  $|\Delta_s| > |l| > \frac{c - c_h}{h - p}$ ) 时使用分时租赁, 而行驶里程超过  $|\Delta_s|$  时, 选择购买私家车. 其中令  $K = -\frac{(c - c_h)^2}{\sigma^2(h - p)}$ , 临界里程为

$$|\Delta_h| = \frac{f/N - c_h + \sqrt{\sigma^2(h - c_v)(v - c_v)N + (c_h - f/N)^2}}{(h - c_v)} \quad (14)$$

$$|\Delta_s| = \frac{\sqrt{\sigma^2(v - c_v)(p - c_v)N - K(p - c_v)\sigma^2 + (c - f/N)^2}}{(p - c_v)} + \frac{f/N - c}{(p - c_v)} \quad (15)$$

限于篇幅, 论文中命题等证明见附录.

该命题刻画了消费者最优出行选择行为, 消费者有两种策略 “网约车 + 购车” (命题 1(1)) 或 “网约车 + 分时租赁 + 购车” (命题 1(2)), 这说明并不是每个消费者都会参与分时租赁. 消费者选择后者的条件是, 私家车价值  $\Omega$  对于行驶里程变化较敏感 (即  $N(v - c_v)$  较大). 命题 1 中消费者策略的内在机理是, 当期效用与未来效用之间的取舍. 行驶里程较短时, 租车能够得到较大的当期效用, 同时保留未来效用增值的机会. 当行驶里程逐渐增加时, 当期效用逐渐减小, 未来效用的增值逐渐无法弥补当期效用的损失. 故行驶里程增大到临界里程时, 消费者会选择购车. 而  $N(v - c_v)$  决定了未来效用增值的幅度, 从而决定临界里程的长短. 若临界里程小于  $\frac{c - c_h}{h - p}$ , 此时网约车比分时租赁更划算 (由式 (9)), 故消费者选择 “网约车 + 购车” 的策略; 若临界里程大于  $\frac{c - c_h}{h - p}$ , 中等里程范围内分时租赁更划算, 故消费者选 “网约车 + 分时租赁 + 购车” 策略.

由该命题推理可知: 1) 消费者出行行为的特征: 消费者只有在行驶里程处于中等水平时才会使用分时租赁, 当行驶里程较高时消费者会购车, 而当行驶里程较低会选择网约车. 由此推断: 分时租赁的出行订单应该集中于中等里程, 网约车的订单应该集中于短途. 引言中的数据印证了该结论. 2) 参与分时租赁的消费者特征: 用车需求不稳定和消费能力较高. 具体来说, 根据条件  $N(v - c_v) > V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)$  可知, 只有里程变化幅度  $\sigma^2$  和支付意愿  $v$  较大时, 消费者才会选择分时租赁 (证明见附录 1). 而行驶里程变化幅度反映了用车需求的稳定, 支付意愿反映了消费能力, 故得出该结论. 证据是, 根据 EVCARD 报告, 35% 受访者选择分时租赁的原因是临时用车 (所有原因中占比最大). 这说明用车需求不稳定的特点. 而 44% 的用户是 80 后, 相比之下, 90 后用户占比 33%, 而根据中国银联联合京东金融共同编制《2017 年消费升级大数据报告》, 80 后比 90 后消费能力更强. 这说明更具支付能力的消费者更多地使用分时租赁.

下面通过一个推论说明, 行驶里程不确定性



与网约车对消费者出行决策的影响. 设行驶里程确定且没有网约车时,  $|\tilde{\Delta}|$  为消费者分时租赁与购车间的临界里程. 行驶里程不确定且没网约车时,  $|\Delta|$  为消费者分时租赁与购车间的临界里程. 附录中给出推论证明与  $|\tilde{\Delta}|$ 、 $|\Delta|$  的具体形式.

**推论 1** 行驶里程的不确定性会延迟购车决策, 即  $|\Delta| > |\tilde{\Delta}|$ ; 而网约车的存在又会使得分时租赁用户进一步延迟购车, 即  $|\Delta_s| > |\Delta| > |\tilde{\Delta}|$ , 故网约车对分时租赁存在延迟效应; 网约车对分时租赁存在竞争效应, 即网约车存在使得分时租赁失去短出行里程的消费者.

由推论 1 可知, 1) 不确定性存在时, 消费者会等待到行驶里程变得更长时才购买汽车. 由于临界里程  $|\tilde{\Delta}|$  即是私家车更划算的里程范围(证明见附录 2). 故  $|\Delta| > |\tilde{\Delta}|$  说明, 不确定性存在时, 即使私家车更划算, 消费者也可能会选择租车, 这解释了引言中提到的现象. 其内在机理为由于未来效用有可能提升, 消费者愿意一定程度上承担当期的损失. 2) 网约车对分时租赁既有竞争效应又有延迟效应. 前者不利于分时租赁, 其原理不赘述. 后者使得消费者进一步延迟购车, 换句话说, 网约车的存在可能使消费者更多使用分时租赁. 这是反直觉的结论, 其内在机理是: 概括来说, 网约车的存在改变了分时租赁的价值. 具体来说, 由于网约车的存在, 在等待最优购车时机的过程中, 消费者可以选择的出行方式增加. 这使得消费者等待时的当期收益上升. 所以, 相对于停止决策, 等待决策的价值上升了, 故消费者会更多地选择等待, 这使得  $|\Delta_s| > |\Delta|$ , 即产生延迟效应. 根据观研天下信息咨询公司发布《2018 年中国汽车租赁行业分析报告 - 市场深度分析与投资前景预测》, 其对 11 158 个分时租赁用户进行调查, 其中 15.4% 用户表示分时租赁使其延迟购车 (<http://market.chinabaogao.com/qiche/05S351132018.html>). 该数据可以证明存在延迟购车的现象, 而且延迟效应符合常识: 可替代的出行选择越多, 私家车出行可能会减少.

**推论 2** 只要行驶里程存在不确定性且分时租赁价格低于网约车(即  $p < h$ ), 私家车和网约车都无法取代分时租赁模式. 但是分时租赁和网约车的存在可能使消费者放弃购车, 消费者放弃购车的必要条件为  $p < h < c_v$ .

通过推论 2 可知, 1) 分时租赁与网约车是共存关系. 虽然命题 1 中某些消费者可能不会选择分时租赁, 但总体来看, 必然有消费者选择分时租赁. 其原理是, 分时租赁价格比网约车更低, 若没人使用分时租赁, 交易成本的降低必然使得  $u > u_h$ , 此时必有消费者选择分时租赁. 现实中, 分时租赁与网约车确实是共存的. 2) 租车价格(包括  $h$  和  $p$ ) 小于私家车使用成本, 是消费者放弃购车的条件. 为了证实这一观点, 引用滴滴研究院的《中国汽车共享出行消费者调查报告》中的调查数据. 该报告对消费者进行调查, 发现租赁价格下降将使消费者放弃购车. “加入价格因素, 61.4% 的用户愿意接受汽车共享出行服务, 放弃拥有汽车: 当共享出行价格下降到私家车成本的 80%, 19.4% 的人愿意放弃拥有汽车; 当共享价格下降到私家车成本的 70% 时, 32.3% 的人愿意放弃拥有汽车; 当共享价格下降到私家车成本的 60% 时, 38.2% 的人愿意放弃拥有汽车”. 由以上数据, 随着价格低于私家车成本的程度越大, 越多人放弃购车. 这与本研究观点吻合.

从管理意义上解释其原理. 概括来说, 消费者放弃购车的原因是, 租赁价格的降低改变了消费者决策的基本矛盾. 具体来说, 当租赁价格低于使用成本时, 行驶里程变化会使得当期收益与未来收益同向变化, 两者的取舍就消失了. 比如, 当  $p < h < c_v$  时, 若行驶里程上升, 消费者选择租车的当期收益会增加(  $\pi$  随  $l$  增), 同时私家车价值也会上升(  $\Omega$  随  $l$  增). 此时, 消费者选择等待的当期收益与未来收益同向变化. 而行驶里程降低说明用车需求较低, 此时支付较高的购车价格也是不划算的. 所以, 租赁价格与私家车使用成本的关系是使消费者放弃购车的关键因素. 虽然目前来看, 租车价格必然高于私家车使用成本, 但该结论及原理对于理解未来出行模式变化趋势仍具有意义, 比如, 自动驾驶技术若能够有效降低租车价格, 未来消费者将更愿意放弃购车.



上文利用最优停止模型分析了消费者最优出行模式选择行为. 归纳来说, 消费者在租车和购车之间的抉择, 实际上是当期效用和未来效用之间的取舍. 取舍的结果是, 消费者会在行驶里程处于中等时选择分时租赁, 行驶里程较短时选择网约车, 当行驶里程较长(即用车需求较大)时, 消费者才会购车(命题1). 当行驶里程变长, 租车会逐渐失去优势. 但租车能够帮助消费者等待最优的购车时机, 所以消费者愿意承担当期损失, 从而追求更大的未来收益(推论1). 这解释了引言中提出的“即使私家车更划算, 但消费者仍然选择分时租赁与网约车”的现象. 其次, 只要行驶里程存在不确定性, 购车就无法取代租车; 而当租车价格低于私家车使用成本时, 消费者会放弃购车. 最后, 从消费者行为角度来看, 网约车不会取代分时

租赁, 两者一定是共存关系(推论2).

#### 4 消费者间出行选择行为的均衡

前面分析了消费者个体的最优决策, 消费者个体的选择会相互影响, 从而影响总体的分时租赁行为, 接下来讨论消费者间的相互影响. 利用均衡分析网约车、分时租赁与私家车出行间的关系, 并研究分时租赁模式存在合并效应的条件. 这是本章节要解决的问题, 研究思路如下: 首先分析消费者整体的均衡, 判断三种出行模式关系; 然后利用均衡状态下参与分时租赁的消费者数量, 推导合并效应的条件. 另外, 由于本文侧重点在于消费者行为, 故企业的租赁和销售价格外生给定.

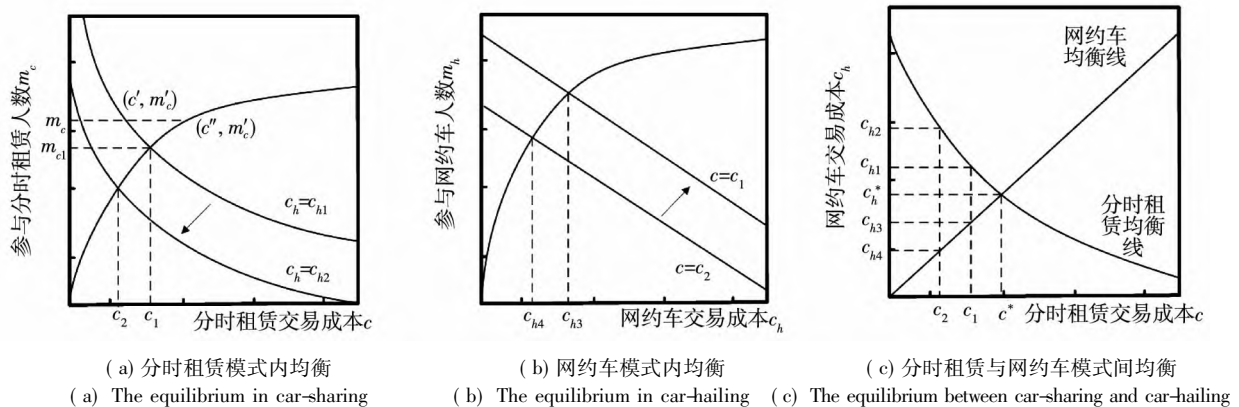


图1 消费者出行选择行为均衡的形成过程

Fig. 1 The process of reaching the equilibrium in consumer travel mode choices

由于网约车与分时租赁中都可能存在均衡, 必须分析两个均衡: 单模式内的均衡以及两模式间的均衡. 根据式(1)及命题1, 消费者间相互影响的机理为, 参与租车的消费者数量增加, 这会增加消费者等待时间, 从而增加交易成本. 而交易成本的增加会改变每个消费者在网约车、分时租赁与购车间的选择. 以图1(a)中的均衡 $(c_1, m_{c1})$ 为例说明单模式内均衡的形成: 图1(a)中增曲线的含义是, 当消费者数量为 $m_c$ 时, 系统中实际的交易成本为 $c$ , 其函数形式为式(1). 而减曲线表示当交易成本为 $c$ 时, 愿意参与分时租赁的消费者数量为 $m_c$ (函数形式见附录4). 均衡形成过程为, 假设初始阶段消费者预计分时租赁的交易成

本为 $c'$ , 此时愿意参与分时租赁的人数为 $m'_c$ . 但当该数量消费者进入分时租赁系统后, 系统实际的交易成本 $c''$ 超过其愿意承担的交易成本, 即 $c'' > c'$ , 这使得部分消费者会退出. 消费者数量的减少降低了交易成本, 而交易成本的降低同时也刺激消费者参与意愿. 最终在 $(c_1, m_{c1})$ 处消费者愿意承担的交易成本恰好为实际产生的交易成本(或愿意参与人数等于实际参与人数), 即达到均衡.

网约车模式内的均衡形成过程与分时租赁相同. 两模式间的均衡形成机理为: 给定网约车交易成本取不同值, 求解分时租赁的均衡, 可以得到 $c$ 与 $c_h$ 的函数关系(如图1(a)中 $c_h = c_{h1}$ 和 $c_h = c_{h2}$

时,对应均衡交易成本为  $c_1$  和  $c_2$ ). 在图 1(c) 中画出该对应关系,得到分时租赁均衡线  $c^*(c_h)$ . 同理,给定不同分时租赁交易成本,求解网约车均衡点,也可得到  $c_h$  与  $c$  的对应关系(图 1(b) 所示,  $c$  取不同值对应不同网约车均衡交易成本  $c_h$ ),并得到网约车均衡线  $c_h^*(c)$  (图 1(c) 所示). 两均衡线的交点即是两模式共同达到均衡的点. 依据上述分析可以得到如下命题.

**命题 2** 均衡存在的充分条件为  $\frac{h-p}{p-c_v} > \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2$ , 此时有且仅有一个均衡点,均衡交易成本满足

$$c^*(c_h)^{-1} = c_h^*(c) \quad (16)$$

其中  $c^*(c_h)^{-1}$  表示  $c^*(c_h)$  的逆函数,  $A_1 = g\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) + g\left(-\frac{c-c_h}{h-p}\right)$  和  $A_2 = g(|\Delta_s|) + g(-|\Delta_s|)$ . 结合中值定理,  $c^*(c_h)$  和  $c_h^*(c)$  由如下隐函数给出

$$\left(g(\xi_1) + g(\xi_2)\right) \left(|\Delta_s(c^*)| - \frac{c^* - c_h}{h-p}\right) = \frac{2\mu^2 c^*}{k + k\gamma^2 + 2\mu k c^*} \quad (17)$$

$$2g(\xi_h) \frac{c - c_h^*}{h-p} = \frac{2\mu_h^2 c_h^*}{k + k\gamma_h^2 + 2\mu_h k c_h^*} \quad (18)$$

命题 2 说明,消费者间出行模式选择行为存在均衡,均衡存在条件与网约车价格、分时租赁价格和消费者行驶里程分布有关,调节均衡的核心是交易成本(即消费者在各模式间流动使得交易成本自发调节). 首先,均衡存在的条件可以概括为,网约车价格与分时租赁价格应具有足够的差距( $h-p > (p-c_v)(A_1/A_2)^2$ ). 网约车与分时租赁的基本关系是竞争,而竞争往往是不稳定的. 只有两者差异较明显时系统才会获得稳定的均衡,这与传统竞争理论是一致的. 其次,两出行模式均衡形成的主要矛盾是消费者参与意愿与系统容纳能力的平衡. 由前文分析可知,式(17)和式(18)的左边为愿意参与人数,这反映了参与意愿;等式右边反映了交易成本与实际参与人数的关系,故

体现了系统容纳能力. 最后,通过均衡的自发调节,分时租赁与网约车的相对关系是稳定的. 结合该命题与命题 1 可发现,均衡时分时租赁用户的行驶里程会高于网约车. 这进一步解释了分时租赁与网约车订单在行驶里程中的分层现象. 而由于均衡的调节作用,这种分层是相对稳定的,即使分时租赁主动通过增加车辆规模等手段降低交易成本,最终均衡也会使  $c_h^* < c^*$ .

结合前文命题与推论,在均衡下,网约车、分时租赁与私家车出行的基本关系可以概括为互补的共存关系(附录 4). 该基本关系中值得说明的是: 1) 三种出行模式是基于竞争的互补关系. 三种出行模式间都存在竞争关系,但由于三种模式间的区别,竞争的结果是形成均衡. 在该均衡中网约车与分时租赁分别服务短里程与中等里程出行,而用车需求较高的用户才会购车. 2) 三者共存关系是通过消费者行为自发调节的稳定关系. 因此,分时租赁应该被理性看待: 由于三模式在所有权与驾驶人方面存在区别,均衡必然使得分时租赁与另两种出行模式形成相对稳定的关系,这导致分时租赁用户的特点难以发生改变,这将对分时租赁车辆使用次数产生限制. 换句话说,分时租赁对车辆利用率的提升作用是有限的. 结合前文结论,分时租赁模式较适于中等里程且临时性的出行. 根据高德报告,中等里程出行的比例明显低于短里程的出行,这一定程度上限制了分时租赁车辆的利用率. 而临时性的特点又进一步限制其车辆利用率,而且临时性与行驶里程是相关的,即对于临界里程较高的用户,其用车需求必然是更不稳定的(由命题 1 可知). 所以,与网约车相比,分时租赁出行需求会表现出更强的临时性特征(即用车需求更不稳定). 根据 36kr 报告与 EVCARD 报告,52% 的网约车用户每周使用 1 次以上,分时租赁的该比例为 44%,其中,24% 的网约车用户每周使用 3 次以上,而分时租赁仅有 5% 的用户每周使用 2 次以上. 这说明分时租赁用车需求更不稳定的特点. 这两点必然导致分时租赁车使用次数和利用率明显少于网约车,现实中

也是如此。

虽然分时租赁车辆利用率受到出行模式间关系的限制,但这并不说明分时租赁不能提升车辆利用率,只是提升程度受到限制.为了深入刻画分时租赁对车辆利用率的提升作用,通过合并效应进一步研究该问题.根据合并效应的含义,设分时租赁系统车辆数为 $n$ ,只要满足 $m^* > n$ ,则一辆分时租赁车能够满足多个消费者用车需求,即合并效应存在.合并效应越大,车辆利用率越高.根据高德报告数据,短里程出行比例明显高于中长里程出行,因此,推论3在该条件下讨论分时租赁的合并效应.

**推论3** 只有分时租赁车辆数 $n < \tilde{m}$ 时,合并效应才可能存在,合并效应存在的必要条件为

$$\frac{kn(1+\gamma^2)}{2\mu(\mu-kn)} < f/N - \frac{(p-c_v)n^2 - 4N(v-c_v)\sigma^2g(\xi)^2}{4ng(\xi)} \quad (19)$$

该推论中 $\tilde{m}$ 表示分时租赁参与人数的上限(具体形式见附录5).结合前文,合并效应是否存在取决于参与意愿与容纳能力的平衡.不等式左边表示参与人数为 $n$ 时的系统等待时间,这反映容纳能力,右边则反映的是参与意愿(附录5).为了直观,利用图像说明推论3.整理上式得 $\gamma^2 = -1 + \frac{2\mu(\mu-kn)}{kn} \left( f/N + \frac{4N(v-c_v)\sigma^2g(\xi)^2}{4ng(\xi)} - \frac{(p-c_v)n^2}{4ng(\xi)} \right)$ .该式为合并效应条件的临界线.将 $\gamma^2$ 看作因变量, $\mu$ 和 $n$ 看作自变量.为了清晰,给定 $\mu$ 取不同值,观察 $\gamma^2$ 与 $n$ 的曲线.从实际含义看, $\mu$ 和 $\gamma^2$ 反映了分时租赁系统的属性,两者不同取值对应了不同类型的系统.因此,式(19)反映了分时租赁系统的特征与合并效应条件之间的关系.值得注意的是,虽然假设中 $\mu$ 和 $\gamma^2$ 都是 $n$ 的函数,但此处并不深入刻画其函数关系,而是令 $\mu$ 和 $\gamma^2$ 自由取值(类似于枚举),然后观察 $\mu$ 、 $\gamma^2$ 与 $n$ 呈现什么关系时合并效应条件被满足,该处理并不影响结论.图2依据具体数值画出,但能反映该函数一般性态(关于 $\mu$ 和 $n$ 分别为增函数和减函数,证明不赘述).

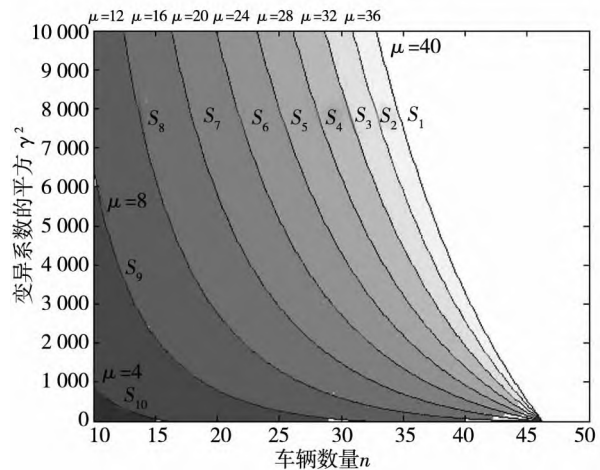


图2 不同服务率取值下合并效应存在的必要条件

Fig. 2 The necessary conditions for the existence of pooling effect under different levels of service rate

(参数取值如下:  $n \in [50, \tilde{m}]$ ,  $v = 15$ ,  $f = 100$ ,  $N = 5$ ,  $p = 6$ ,  $c_v = 1$ ,  $\sigma = 5$ ,  $k = 0.25$ )

图2中曲线表示 $\mu$ 取各值时合并效应存在的必要条件(各临界线标记为 $S_i$ ),临界线以上表示合并效应不存在,而临界线以下表示合并效应存在的条件被满足.图中阴影区域标出了满足该条件的区域,阴影的深度表示 $\mu$ 取各值时存在合并效应区域的重叠.以曲线 $S_1$ 与 $S_2$ 之间区域为例,只有 $\mu = 40$ 时该区域存在合并效应, $\mu$ 取其他值时均不存在合并效应,故该区域阴影最浅(重叠次数最少).而对于 $S_{10}$ 以下区域,所有 $\mu$ 的取值在该区域均满足合并效应条件,故阴影最深(重叠最多).图中每一个点对应了不同类型的分时租赁系统,比如, $n$ 较大且 $\gamma^2$ 较大表示规模( $n$ )较大,服务时间稳定性较差的系统.另外,将条件 $m^* > n$ 变换为 $m^* = n + d$ , $d$ 反映了参与人数超过车辆数的程度,即 $d$ 为合并效应的程度.明显地,远离临界线( $d$ 较大)使得合并效应的增大.

结合上述说明,图2反映了分时租赁系统三个特征(即车辆规模、服务率和服务时间稳定性)与合并效应的关系.1)较高的服务率和较稳定的服务时间更有利于提升合并效应,而车辆规模对合并效应有正反两种作用.从图像上看, $\mu$ 的增加扩大了阴影区域,而 $\gamma^2$ 的降低使得阴影加深,这说明两种变化有利于合并效应.而车辆规模 $n$ 使

得阴影变浅,这不利于合并效应,但规模  $n$  增加使得服务率  $\mu$  提升(车辆增多使单位时间服务人数增加),这使得临界线向右移动,这又有利于合并效应. 2) 车辆规模较大不是合并效应存在的必要条件,较小规模也存在合并效应. 当  $n$  较小时,阴影区域仍存在,这说明该结论. 3) 规模较小时合并效应程度较低,只有规模较大时,合并效应才可能较高. 当规模小时服务率较低,阴影内的点与临界线间距离必然较近,而只有服务率较大时,阴影内的点才可能离临界线较远,故得到该结论.

结合该推论与命题 2, 1) 分时租赁能够起到提升车辆利用率的作用,引言中 TOGO 报告数据说明这一点. 但该作用受到出行模式间关系的限制,所以分时租赁的使用次数必然低于网约车. 除此之外,只有分时租赁系统服务水平较高(服务率较高和服务时间较稳定)时,车辆利用率才较高. 由此可以发现,分时租赁车辆利用率提升的条件是相对苛刻的,这解释了引言中车辆使用次数偏低的现象. 2) 对于分时租赁企业而言,高资本投入(如购置车辆)和盈利困难是两个难题,合并效应有利于解决该难题. 合并效应的提升增加了车辆利用率(一辆车被更多人使用),同等投入情况下车辆使用次数增加,这有利于盈利. 根据上文,企业通过合理设计系统的规模、服务率和服务时间稳定性,可以实现合并效应,而且合并效应的实现并不需要较大规模的投入. 但为了更多盈利,企业应该合理增加车辆规模从而追求更高服务率. 值得注意的是,车辆规模并非越大越好,如果车辆规模的增大没能提升服务率,或造成服务时间更不稳定,这可能会减小合并效应. 而且分时租赁系统设计应该考虑到分时租赁模式与其他模式关系,出行模式间均衡决定了分时租赁参与人数存在上限,这限制了合并效应.

综上,从消费者行为视角,网约车、分时租赁与私家车出行是互补的共存关系(命题 2). 分时租赁在汽车出行模式中具有独特的定位,即服务于中等里程且临时性的出行需求. 该定位并非是

企业主观决定,而是均衡调节的结果(命题 2). 该定位决定了分时租赁不会被其他模式取代,但同时也限制了其发展空间: 中等里程出行占比相对较低,和临时性的特点都限制了分时租赁车辆的利用率. 通过提升服务率和保持服务时间稳定,能提升分时租赁车辆合并效应,但提升程度受到愿意参与人数上限限制(推论 3).

## 5 算例分析

为了展示不同参数对均衡的影响,下面分析均衡下用户数量( $m_c$  和  $m_h$ )、交易成本( $c$  和  $c_h$ )和出行效用( $u$  和  $u_h$ )随各参数的变化. 基本参数取值如下:  $h = 3$ 、 $p = 2$ 、 $c_v = 0.8$ 、 $f = 100\ 000$ 、 $N = 3\ 000$ 、 $v = 40$ 、 $\mu = 10$ 、 $\gamma^2 = 40$ 、 $\mu_h = 12$ 、 $\gamma_h^2 = 35$ 、 $k = 0.25$ 、 $\sigma^2 = 2$ .  $g(\xi_1)$  和  $g(\xi_2)$  表示中等里程的概率密度,  $g(\xi_h)$  表示短里程的概率密度,设  $g(\xi_1) + g(\xi_2) = 0.2$  和  $g(\xi_h) = 0.3$ . 该组参数取值描述的基本场景是,支付意愿较高且行驶里程不确定的消费者在租车与购车(车辆价格为 10 万元)间进行选择,网约车与分时租赁价格之间关系和不同里程出行的概率密度之间关系均符合假设. 基于均衡中的主要矛盾,主要讨论价格( $h$  和  $p$ )、消费者特征(即  $v$  和  $\sigma^2$ )和服务率( $\mu$  和  $\mu_h$ )三个方面因素对均衡的影响.

### 5.1 价格因素对均衡的影响

图 3(a) ~ 图 3(c) 反映了价格  $h$  和  $p$  对分时租赁均衡下交易成本、用户数量和出行效用的影响. 对应地,图 3(d) ~ 图 3(f) 反映了该因素对网约车均衡的影响. 由上图可以总结, 1) 网约车交易成本低于分时租赁(图 3(a) 和图 3(d)), 这印证了前文  $c_h < c$  的判断; 2) 网约车与分时租赁具有竞争和依赖双重关系,这与前文的原理一致(推论 1). 由图 3(a) 和图 3(b),随着网约车价格  $h$  的提升,分时租赁的均衡交易成本  $c$  和用户数量  $m_c$  都有轻微的提升,这说明网约车变得不划算时,分时租赁消费者会增多,即两者有竞争关系. 由图 3(d) 和图 3(e),随着分时租赁价格  $p$  降低,

网约车的交易成本  $c_h$  和用户数量  $m_h$  都有所增加,这说明分时租赁变得划算时,网约车用户也会增加,即两者间存在依赖关系.值得指出的是,推论 1 证明了网约车与分时租赁间的竞争与依赖的双重关系(即竞争效应和延迟效应),推论 3 的附录中证明了竞争效应对分时租赁影响更大,所以图 3(a) 和图 3(b) 中更多表现出竞争关系,这对结论是一个验证. 3) 均衡下分时租赁更不易受网约车价格的影响,而相对而言,网约车受分时租赁价格影响更大. 由图 3(b) 和图 3(e) 可以看出,分时租赁的均衡用户数量  $m_c$  受  $h$  的影响相对较小,但随  $p$  的下降,网约车用户数量  $m_h$  增加较明显. 4) 图 3(c) 和图 3(f) 反映了价格对出行效用的影响,为了便于比较,图中效用以单次出行 10 km 为基准(即令  $|l| = 10$  代入式(2) 和式(3) 计算出效用后比较). 可以发现,并非价格越低,出行效用就越高. 较低的价格使得用户数量增加,这会导致均衡交易成本升高,从而减小了出行效用.

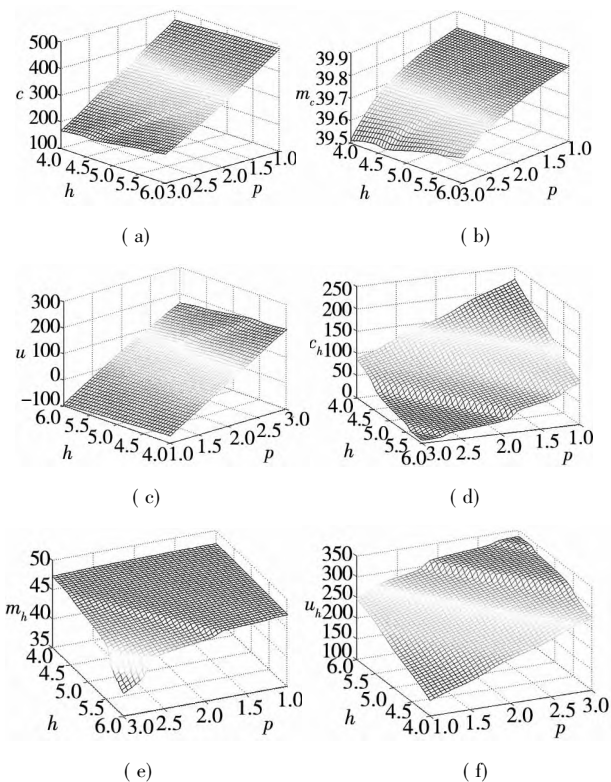


图 3 价格因素对均衡下交易成本、用户数量和效用的影响

Fig. 3 The impact of price on transaction cost, number of users, utility in equilibrium

## 5.2 消费者特征因素对均衡的影响

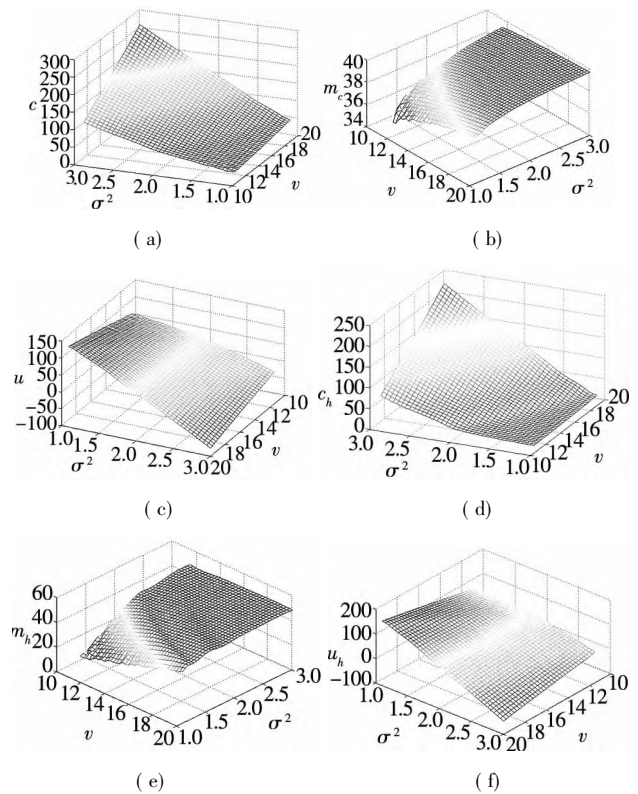


图 4 消费者特征对均衡下交易成本、用户数量和效用的影响

Fig. 4 The impact of consumer features on transaction cost, number of users, utility in equilibrium

图 4 表现了消费者支付意愿  $v$  和行驶里程变化幅度  $\sigma^2$  对均衡的影响. 1) 由图 4(a) 和图 4(d) 发现,  $\sigma^2$  和  $v$  的增加促使交易成本( $c$  和  $c_h$ ) 增加,这说明用车需求不稳定( $\sigma^2$  较大)和支付意愿较高( $v$  较大)促使消费者更多选择分时租赁和网约车,这与前文结论相符. 2) 在消费者支付意愿较高的情况下,行驶里程变化幅度对用户数量的影响较小,反之则较大. 由图 4(b) 和图 4(e),当  $v$  较大时,  $\sigma^2$  的增加仅使  $m_c$  和  $m_h$  上升较小的幅度,当  $v$  较小时,  $m_c$  和  $m_h$  对  $\sigma^2$  的变化较敏感,由此得出该结论. 3) 由图 4(c) 和图 4(f),由于用车需求不稳定会使交易成本上升,故网约车和分时租赁出行效用( $u$  和  $u_h$ ) 随着  $\sigma^2$  的增加而降低. 而消费者支付意愿的升高对出行效用有正反两种作用,一方面,支付意愿较高说明消费者从每 km 出行中所获得的效用增加,故  $v$  对  $u$  和  $u_h$  有提升作用;另一方面,消费者支付意愿的

提升会使更多消费者选择租车,这增加了交易成本,故 $v$ 对 $u$ 和 $u_h$ 有抑制作用.结合图4(a)和图4(d)可知,当 $\sigma^2$ 较大时,交易成本 $c$ 和 $c_h$ 关于 $v$ 的敏感性较高,此时抑制作用大于提升作用.当 $\sigma^2$ 较小时,交易成本对于 $v$ 的变化不敏感,此时提升作用大于抑制作用.所以,用车需求不稳定时,支付意愿的增加会使出行效用下降,而用车需求较稳定时,支付意愿增加使效用上升.

### 5.3 服务率因素对均衡的影响

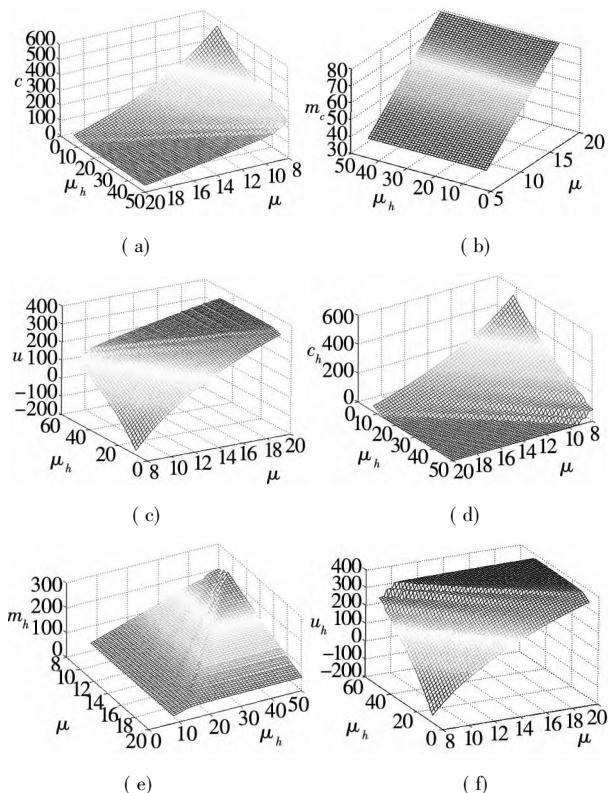


图5 服务率对均衡下交易成本、用户数量和效用的影响

Fig. 5 The impact of service rate on transaction cost, number of users, utility in equilibrium

图5反映了服务率 $\mu$ 和 $\mu_h$ 对均衡的影响.1) 服务率的提升有利于降低交易成本同时增加用户数量.如图5(a)和图5(d)所示,服务率 $\mu$ 和 $\mu_h$ 的提升共同降低了交易成本 $c$ 和 $c_h$ .由图5(b)和图5(e), $\mu$ 和 $\mu_h$ 的增加分别提升了各自的用户数量 $m_c$ 和 $m_h$ .2) 服务率 $\mu$ 和 $\mu_h$ 之间存在相互影响,网约车更易受到分时租赁的影响.由图5(a)(或图5(d)),当 $\mu_h$ (或 $\mu$ )逐渐增大时, $\mu$ (或 $\mu_h$ )对交易成本 $c$ (或 $c_h$ )的影响会逐渐减弱.这说明分

时租赁(或网约车)服务率降低时,网约车(或分时租赁)的交易成本对自身服务率变化更敏感.由图5(b)和图5(e),分时租赁用户数量对网约车服务率不敏感,但网约车用户数量受到分时租赁服务率的限制.如图5(e)所示,当 $\mu$ 较大, $\mu_h$ 的增加仅使 $m_h$ 上升较小幅度,而当 $\mu$ 较小, $\mu_h$ 对 $m_h$ 的影响增大.所以,结合图3的结论,网约车更易受分时租赁的影响.3) 由于服务率的变化仅影响出行效用中的交易成本,服务率的增加会导致交易成本减小,故出行效用 $u$ 和 $u_h$ 随服务率增加而增加,如图5(c)和图5(f)所示.

## 6 结束语

从消费者微观行为出发,研究消费者在分时租赁、网约车与私家车之间的出行选择;然后以此为基础,推导消费者间出行选择行为的均衡,从而得到了三种汽车出行模式的关系,并分析了分时租赁下合并效应存在的条件.刻画了两个基本矛盾:从微观行为来说,消费者在租车与购车之间的选择实际上是当期收益和未来收益的平衡;从均衡的角度来说,消费者参与意愿与分时租赁系统的容纳能力是均衡中的基本矛盾.总体上,网约车、分时租赁与私家车出行是互补的共存关系,该关系决定了分时租赁不会被其他汽车出行模式取代,但分时租赁的独特定位也限制了自身的发展.具体来说,得到如下结论:

从消费者行为角度,1) 消费者倾向于在短途出行中使用网约车,中等里程使用分时租赁,而用车需求较高时才会购车.为了获得更高的未来效用,消费者愿意承担一定的当期损失,所以在私家车出行更划算的里程范围内,消费者仍然会使用网约车与分时租赁.2) 网约车对分时租赁既有竞争效应又有延迟效应,即网约车的存在减少了分时租赁短里程的用户,但同时使消费者等待到行驶里程更长时才购车,故增加了分时租赁中等里程的用户.3) 私家车出行不会取代网约车与分时租赁,但当租车价格低于私家车使用成本时,消费者会放

弃购车. 其原因是, 该条件下当期效用与未来效用同向变化, 这使得出行选择决策中的取舍关系消失.

从均衡的角度, 1) 由于均衡调节作用, 网约车、分时租赁与私家车出行会形成互补共存关系. 该关系是由各模式间差异所决定, 并由消费者自发调节而形成. 该关系保证三者的共存, 但同时限制了分时租赁发展. 即分时租赁主要服务于中等里程且临时性的出行需求, 该部分用户数量是有限的且用车需求不稳定, 故车辆利用率受到限制. 2) 服务率相对较高且服务时间相对稳定有利于提升合并效应. 车辆规模并不是合并效应存在的必要条件, 但企业应该适当提升车辆规模, 增加服务率, 从而提高合并效应程度. 3) 通过算例分析, 发现网约车和分时租赁会表现出竞争和依赖的双重关系; 网约车更易受到分时租赁的影响, 而分时

租赁受网约车影响相对较小.

从消费者行为视角探讨分时租赁问题, 对当前运营管理现象提出了合理的解释. 其结论与原理的应用范围并不仅限于上文讨论的内容, 还可应用于挖掘出行数据价值. 比如, 结合网约车与分时租赁订单数据中的里程信息, 结论可以帮助判断潜在购车用户. 进一步的研究可以将企业运营策略与消费者分时租赁行为相结合. 实践中分时租赁的规模效应常被关注, 但规模效应是否存在, 这需要理论验证. 该问题不仅涉及企业运营还须考虑消费者行为, 这是本文未来延伸的方向. 另外, 消费者的用车需求在行驶里程和用车频次等方面都有一定的随机性, 将多维的随机变量融入模型可以更细致地刻画消费者行为, 这也是值得深入研究的方向.

## 参 考 文 献:

- [1] Bellos I, Ferguson M, Toktay L B. The car sharing economy: Interaction of business model choice and product line design [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2017, 19(2): 185–201.
- [2] Yu Y, Dong Y, Guo X. Pricing for sales and per-use rental services with vertical differentiation [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 270(2): 586–598.
- [3] Agrawal V V, Bellos I. The potential of servicizing as a green business model [J]. *Management Science*, 2016, 63(5): 1545–1562.
- [4] Gilbert S M, Randhawa R S, Sun H. Optimal per-use rentals and sales of durable products and their distinct roles in price discrimination [J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(3): 393–404.
- [5] Balasubramanian S, Bhattacharya S, Krishnan V V. Pricing information goods: A strategic analysis of the selling and pay-per-use mechanisms [J]. *Marketing Science*, 2015, 34(2): 218–234.
- [6] Abouee-Mehrizi H, Baron O, Berman O, et al. Adoption of electric vehicles in car sharing market [J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(1): 190–209.
- [7] Örsdemir A, Deshpande V, Parlaktürk A K. Is servicization a win-win strategy? Profitability and environmental implications of servicization [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2018, 21(3): 1–18.
- [8] Jiang B, Tian L. Collaborative consumption: Strategic and economic implications of product sharing [J]. *Management Science*, 2016, 64(3): 1171–1188.
- [9] Tian L, Jiang B. Effects of consumer-to-consumer product sharing on distribution channel [J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(2): 350–367.
- [10] Benjaafar S, Kong G, Li X, et al. Peer-to-peer product sharing: Implications for ownership, usage, and social welfare in the sharing economy [J]. *Management Science*, 2019, 65(2): 477–493.
- [11] 吕 通, 史乐峰. 考虑网络效应的共享汽车租赁网络扩展分析 [J]. *科技管理研究*, 2018, 38(9): 198–210.  
Lü Tong, Shi Lefeng. Analysis on car sharing network development based on network effect [J]. *Science and Technology Management Research*, 2018, 38(9): 198–210. (in Chinese)
- [12] 黄毅祥, 蒲勇健. 新能源汽车分时租赁市场竞争的进化博弈模型研究 [J]. *中国管理科学*, 2018, 26(2): 79–85.



- Huang Yixiang, Pu Yongjian. Research on the evolutionary game model of the new energy vehicle rental market competition [J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(2): 79–85. (in Chinese)
- [13] 黄毅祥, 蒲勇健, 孙衍华. 电动汽车分时租赁市场联盟定价博弈 [J]. 软科学, 2018, 32(2): 20–23.  
Huang Yixiang, Pu Yongjian, Sun Xianhua. Coalitional game in the car-sharing market of electric vehicle [J]. Soft Science, 2018, 32(2): 20–23. (in Chinese)
- [14] Branco F, Sun M, Villas-Boas J M. Optimal search for product information [J]. Management Science, 2012, 58(11): 2037–2056.
- [15] Ke T T, Shen Z J M, Villas-Boas J M. Search for information on multiple products [J]. Management Science, 2016, 62(12): 3576–3603.
- [16] Ke T T, Villas-Boas J M. Optimal learning before choice [J]. Journal of Economic Theory, 2019, (180): 383–437.
- [17] De Lapparent M, Cernicchiaro G. How long to own and how much to use a car? A dynamic discrete choice model to explain holding duration and driven mileage [J]. Economic Modelling, 2012, 29(5): 1737–1744.
- [18] Cirillo C, Xu R, Bastin F. A dynamic formulation for car ownership modeling [J]. Transportation Science, 2015, 50(1): 322–335.
- [19] Liu Y, Cirillo C. A generalized dynamic discrete choice model for green vehicle adoption [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, (114): 288–302.
- [20] 徐淑贤, 刘天亮, 黄海军, 等. 自驾偏好、居民异质与居住选址——基于单中心城市模型的空间均衡分析 [J]. 管理科学学报, 2020, 23(6): 73–89.  
Xu Shuxian, Liu Tianliang, Huang Haijun, et al. Preference for auto driving, resident heterogeneity and residential location choice: Urban spatial equilibrium analysis based on the monocentric city model [J]. Journal of Management Sciences in China, 2020, 23(6): 73–89. (in Chinese)
- [21] 徐薇, 马箫宇, 徐红利. 双目标用户均衡下的交通流逐日动态演化模型 [J]. 管理科学学报, 2020, 23(7): 116–126.  
Xu Wei, Ma Xiaoyu, Xu Hongli. A day-to-day traffic dynamic model with bi-objective user equilibrium [J]. Journal of Management Sciences in China, 2020, 23(7): 116–126. (in Chinese)
- [22] Avcı B, Girotra K, Netessine S, et al. Electric vehicles with a battery switching station: Adoption and environmental impact [J]. Management Science, 2015, 61(4): 772–794.
- [23] Lim M K, Mak H, Rong Y, et al. Toward mass adoption of electric vehicles: Impact of the range and resale anxieties [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2015, 17(1): 101–119.
- [24] Zhou W, Chao X, Gong X. Optimal uniform pricing strategy of a service firm when facing two classes of customers [J]. Production and Operations Management, 2014, 23(4): 676–688.
- [25] Villas-Boas, Miguel J. A dynamic model of repositioning [J]. Marketing Science, 2018, 37(2): 279–293.
- [26] Dixit A K, Dixit R K, Pindyck R S. Investment under Uncertainty [M]. NJ: Princeton, Princeton University Press, 1994.
- [27] Desai P, Purohit D. Leasing and selling: Optimal marketing strategies for a durable goods firm [J]. Management Science, 1998, 44(11): S19–S34.

## Analysis of consumer travel mode choices in car-sharing

WAN Mi-yu<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2\*</sup>, CHENG Yong-sheng<sup>3</sup>, LUO Chun-lin<sup>2</sup>

1. School of Transportation and Logistics, East China JiaoTong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Information Management, Jiangxi University of Finance and Economic, Nanchang 330032, China;

3. School of Business Administration, Jiangxi University of Finance and Economic, Nanchang 330032, China

**Abstract:** This paper explores the relationship among car-sharing, online car-hailing and private car from the

perspective of consumer behavior. The optimal stopping theory is applied to investigating the optimal consumer choices among car-sharing, car-hailing and private car. Based on the individuals' optimal decisions, the equilibrium is derived, and the existence condition of pooling effect in car-sharing is obtained. The research shows that the uncertainty of driving mileage delays consumers' purchasing decisions, so that even when purchasing private cars is more cost-saving, consumers may still choose car-sharing and car-hailing. Car-hailing has both a competition effect and a delayed effect on car-sharing. When the price gap between car-sharing and car-hailing is large, an equilibrium in consumer travel mode choices exists. This equilibrium determines that the relationship among the travel modes is complementary and coexisting, which limits the development of car-sharing: car-sharing is always fit for medium-mileage and temporary travel, which restricts the times that vehicles are used in car-sharing. The existence condition of pooling effect is related to the service rate and stability of service time, and the number of vehicles in car-sharing is not a necessary condition for the existence of pooling effect.

**Key words:** optimal stopping; car-sharing; business model; consumer behavior; transaction cost

## 附录 1

### 命题 1 的证明:

根据文献 [25] (及其 online appendix) 的求解方法, 价值函数在分段点处必须要满足平滑粘贴和价值匹配条件 (即价值函数必须是连续且可导, 否则微分方程在分段点处不存在). 因此, 在两个分段点  $|l| = 0$  和  $\left| \frac{c - c_h}{h - p} \right| = 0$  处, 必然有  $V(0)^- = V(0)^+$ 、 $V'(0)^- = V'(0)^+$ 、 $V\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)^- = V\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)^+$  和  $V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)^- = V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)^+$ , 其中由于对称性,  $V'(0)^- = V'(0)^+ = 0$ . 这些条件共同决定了微分方程系数, 代入求解有  $C_1 = 0$ 、 $C_2 = C_4 - \frac{(c - c_h)^3}{3\sigma^2(h - p)^2}$ 、 $C_3 = -\frac{(c - c_h)^2}{\sigma^2(h - p)}$ . 求出以上参数后, 还需求解  $C_4$  和  $|\Delta|$ , 联立式 (12) 和式 (13) 可以求解两未知数. 由于价值函数为分段函数, 临界点  $|\Delta|$  有可能发生在两个分段之中, 故分情况讨论. 根据函数  $V$  的性态可知 (连续可导及增减性), 只存在一个  $|\Delta|$  使得平滑粘贴条件被满足. 若分段点处导数  $V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)$  大于  $N(v - c_v)$ , 那么  $V(l)$  与  $\Omega(l)$  的切点一定在  $[0, \frac{c - c_h}{h - p}]$  范围内, 故令  $\frac{(h - c_v)|l|^2 + 2|l|(c_h - f/N)}{\sigma^2} = N(v - c_v)$ , 求解得到  $|\Delta_h|$  (舍去负解, 如式 (14)). 若分段点处导数  $V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)$  小于  $N(v - c_v)$ , 令  $\frac{(p - c_v)|l|^2 + 2|l|(c - f/N)}{\sigma^2} - \frac{(c - c_h)^2}{\sigma^2(h - p)} = N(v - c_v)$  可得  $|\Delta_s|$  (如式 (15), 舍去负解). 将  $|\Delta_h|$  与  $|\Delta_s|$  代入式 (12) 分别得两情况下系数  $C_4$  (不影响讨论故不写出具体的形式). 展开  $V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right)$ ,  $V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right) < N(v - c_v)$  可写为  $N(v - c_v)\sigma^2 > \frac{(c - c_h)((h - 2p + c_v)c_h + c(h - c_v))N - 2f(h - p)}{(h - p)^2N}$ , 明显地,  $v$  和  $\sigma^2$  较大时,  $V'\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right) < N(v - c_v)$  被满足, 故得相应结论. 证毕.

## 附录 2

### 推论 1 的证明:

首先求解网约车不存在且不确定性里程时, 消费者最优停止决策. 由于网约车的消失不影响租车与购车间的基本矛盾, 也不影响私家车价值  $\Omega$ , 故最优停止问题仍如式 (6). 但是当期效用变为  $\hat{\pi}(l) = (v - p)|l| - c - (v - c_v)|l| + f/N$ ,

即等待时消费者的选择减少了. 该模型的平滑粘贴条件和价值匹配条件仍然不变(因终止价值不变), 且  $|l| = 0$  处有  $V'(0)^- = V'(0)^+$ . 将这些定解条件, 结合附录1中相同方法, 可以求解出网约车不存在时, 等待与停止的临界里程为(舍去负解)

$$|\Delta| = \frac{f/N - c + \sqrt{(p - c_v)N(v - c_v)\sigma^2 + (c - f/N)^2}}{p - c_v} \quad (\text{A1})$$

其次, 求解确定里程且没有网约车情况下消费者临界行驶里程. 由于行驶里程不变化, 只要购车在某一期的效用要高于分时租赁, 那么每一期效用都高于分时租赁, 此时消费者选择购车就是最优选择, 反之应选分时租赁. 由此得到临界行驶里程必然满足  $(v - p)|l| - c = (v - c_v)|l| - f/N$  (由该式, 此时临界里程即是私家车划算的里程范围). 计算求解  $|l|$ , 可得行驶里程确定时, 消费者购车的临界里程: 当  $c - f/N < 0$  时,  $|\tilde{\Delta}| = \frac{f/N - c}{p - c_v}$ ; 当  $c - f/N \geq 0$  时,  $|\tilde{\Delta}| = 0$ . 由于  $c_v < p$ , 若  $c - f/N > 0$ , 对于任何  $|l|$ ,  $(v - p)|l| - c < (v - c_v)|l| - f/N$  都成立. 此时消费者会立即买车, 即  $|\tilde{\Delta}| = 0$ , 故为分段函数. 明显地,  $|\Delta| > |\tilde{\Delta}|$ . 由计算过程可知,  $|\tilde{\Delta}|$  反映了私家车更划算的里程范围. 令  $|\Delta|$  与  $|\Delta_s|$  相比较, 由于  $-K(p - c_v)\sigma^2 > 0$ , 故  $|\Delta_s| > |\Delta|$ , 即选择分时租赁的消费者会延迟购车. 又由于  $|\Delta_s| > |\Delta| > |\tilde{\Delta}|$ , 所以网约车的存在是进一步延迟. 结合命题1, 网约车存在时, 短里程用户会选择网约车, 若网约车不存在, 短里程用户会选择分时租赁(由临界里程  $|\Delta|$  可知), 所以网约车对分时租赁有竞争作用. 证毕.

### 附录3

#### 推论2的证明:

首先, 证明  $p < h$  时网约车不会取代分时租赁. 虽然前文证明, 部分消费者只在网约车与购车间进行选择(命题1中的1)), 但不可能所有消费者都是如此. 利用反证法, 若所有消费者都不选择分时租赁, 必然出现分时租赁交易成本小于网约车的情况, 即  $c < c_h$ . 但由于  $p < h$ , 此时根据式(2)和式(3),  $c < c_h$  必然使得分时租赁的效用高于网约车, 那么必然有消费者选择分时租赁, 直至  $c > c_h$ . 这与所有消费者都不选择分时租赁矛盾. 故网约车不会取代分时租赁. 这也证明了假设  $c > c_h$  的成立.

其次, 证明不确定性的存在使得购车模式无法取代租车模式. 前文已经证明, 当不确定存在时, 消费者按照命题1进行决策. 消费者完全放弃租车, 等同于任何行驶里程下消费者都会买车, 即临界里程为0. 所以问题转化为讨论临界里程为0的条件. 由于  $c > c_h$  必然使得  $\left(\frac{c - c_h}{h - p}\right) > 0$ . 所以, 若某个消费者临界里程为0的情况成立, 那么该消费者一定属于命题1中的(1)的情况(临界里程0在  $[0, \frac{c - c_h}{h - p}]$  内, 由附录1可知, 此时必然为该情况). 根据式(14)容易判断, 只有  $\sigma^2 = 0$  且  $c_h - f/N > 0$  时,  $|\Delta_h| = 0$  (其他参数在取极限时也使  $|\Delta_h| = 0$ , 如  $h$  趋于无穷, 但这不符合现实). 而  $\sigma^2 = 0$  表示不确定性没有影响, 所以只有确定条件下消费者才会完全放弃租车.

再次, 证明  $p < h < c_v$  是消费者放弃购车的必要条件. 为了证明该结论, 暂时放松  $h > p > c_v$  的假设. 设租赁价格低于使用成本, 即  $c_v > h > p$ . 该变化不影响贝尔曼方程的建立以及后续的泰勒展开等处理, 所以利用附录1中相同方法可以求得  $|\tilde{\Delta}_h| = \frac{c_h - f/N \pm \sqrt{\sigma^2(h - c_v)(v - c_v)N + (c_h - f/N)^2}}{(c_v - h)}$  和  $|\tilde{\Delta}_s| = \frac{c - f/N \pm \sqrt{\sigma^2(v - c_v)(p - c_v)N - K(p - c_v)\sigma^2 + (c - f/N)^2}}{(c_v - p)}$ . 分析上述临界里程, 当  $c_h - f/N < 0$  时, 由于  $h < c_v$ , 根号内的式子必然小于  $|f/N - c_h|$ , 故  $|\tilde{\Delta}_h|$  分子必然小于0. 同理  $c - f/N < 0$  时,  $|\tilde{\Delta}_s| < 0$ . 临界里程小于0说明, 在定义域内不存在购车的临界点. 故上述情况下, 临界里程不存在. 当  $c_h - f/N > 0$  或  $c - f/N > 0$  时, 若根号内的式子小于0, 临界里程不存在. 求出根号内小于0的条件容易发现,  $c_v > h > p$  包含了该条件. 由于

$c_h - f/N > 0$  或  $c - f/N > 0$  时,  $c_v > h > p$  中部分情况仍可能购车, 故  $c_v > h > p$  仅是必要条件. 考虑到结论清晰及可用性, 仅总结必要条件即可. 证毕.

#### 附录 4

##### 命题 2 的证明:

该命题证明思路为, 通过单调性与上下界证明交点的存在. 首先要证明图 1(a) 和图 1(b) 中  $c$  与  $c_h$  都是一一对应且均衡线  $c^*(c_h)$  和  $c_h^*(c)$  为一增一减; 然后证明两均衡线存在交点.

第一步, 证明给定  $c$  时网约车有且仅有一个均衡点且均衡线  $c_h^*(c)$  为增. 根据前文分析, 均衡线  $c_h^*(c)$  上的点必然满足愿意参与人数等于实际参与人数. 故先求愿意参与人数与实际参与人数. 由于附录 3 已证明  $c > c_h$  且不可能所有消费者都选择网约车, 这说明均衡一定满足命题 1 中的 (2) 的情况 (即一定有人选分时租赁). 故根据命题 1 中的 (2), 给定  $c$ , 里程在  $\left(0, \frac{c-c_h}{h-p}\right]$  范围内的消费者愿意参与, 故愿意参与人数为  $m_h = \int_{\frac{c-c_h}{h-p}}^{\frac{c-c_h}{h-p}} g(l) dl$ . 其导数  $\frac{\partial m_h}{\partial c_h} = -\frac{1}{h-p} \left( g\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) + g\left(-\frac{c-c_h}{h-p}\right) \right) < 0$ . 而  $c_h = \frac{km_h(1+\gamma_h^2)}{2\mu_h(\mu_h - km_h)}$  的反函数即是实际参与人数, 且该式是关于  $m_h$  的增函数.

根据中值定理,  $\exists \xi_h \in \left(-\frac{c-c_h}{h-p}, \frac{c-c_h}{h-p}\right)$  使得  $m_h = 2g(\xi_h) \frac{c-c_h}{h-p}$ . 均衡交易成本  $c_h^*$  必然使愿意参与与实际参与人数相等, 故得到式 (18). 由于  $c > c_h$ , 故  $c_h = c$  是上界. 而  $c_h = c$  时, 等式左边为 0, 而右边必然大于 0 ( $c_h \neq 0$  时排队人数不为 0), 而且  $c_h = 0$  时, 右边必然为 0, 左边大于 0. 又等式两边为一增一减, 故给定  $c$  时网约车内部有且仅有一个均衡点 ( $c_h^*$  与  $c$  一一对应). 又  $c$  的变化只影响等式左边, 且明显地, 随  $c$  增大, 等式左边为增, 故  $c_h^*$  关于  $c$  的增函数 (图像上,  $c$  的增大等式左边所代表曲线向上移, 即图 1(b) 中的减曲线向上移, 故网约车均衡线为增).

第二步, 证明给定  $c_h$  时分时租赁有且仅有一个均衡点且均衡线  $c^*(c_h)$  为减. 愿意参与人数为  $m_c = \int_{\frac{c-c_h}{h-p}}^{\frac{c-c_h}{h-p}} g(l) dl + \int_{-\frac{c-c_h}{h-p}}^{\frac{c-c_h}{h-p}} g(l) dl$ , 导数  $\frac{\partial m_c}{\partial c} = \frac{\partial |\Delta_s|}{\partial c} \left( g(|\Delta_s|) + g(-|\Delta_s|) \right) - \frac{1}{h-p} \left( g\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) + g\left(-\frac{c-c_h}{h-p}\right) \right)$ . 由于  $\frac{\partial |\Delta_s|}{\partial c} = \frac{(c-c_h)(p-c_v)}{(h-p)A} + \frac{c-f/N}{A} - 1$ , 其中  $A = \sqrt{\sigma^2(v-c_v)(p-c_v)N - K(p-c_v)\sigma^2 + (c-f/N)^2}$ . 由此可知  $\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) < \frac{f/N - c + A}{(p-c_v)}$  时  $\frac{\partial |\Delta_s|}{\partial c}$  为减, 而反之为增. 因  $|\Delta_s| = \frac{f/N - c + A}{(p-c_v)}$ , 故减的条件为  $\frac{c-c_h}{h-p} < |\Delta_s|$ . 将命题 1 中的 (2) 的条件  $V\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) < N(v-c_v)$  展开可知, 该情况下必然有  $\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) < |\Delta_s|$ . 所以  $\frac{c-c_h}{h-p} > |\Delta_s|$  不可能出现. 所以上式必为减函数, 且  $\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) < |\Delta_s|$  决定了  $c$  上界. 又  $c = \frac{km_c(1+\gamma^2)}{2\mu(\mu - km_c)}$  决定了实际参与人数, 且为增函数. 结合中值定理,  $\exists \xi_1 \in \left[\frac{c-c_h}{h-p}, |\Delta_s|\right]$  和  $\exists \xi_2 \in \left[-|\Delta_s|, -\frac{c-c_h}{h-p}\right]$  使  $m_c = (g(\xi_1) + g(\xi_2)) \left(|\Delta_s| - \frac{c-c_h}{h-p}\right)$ . 根据愿意参与人数等于实际参与人数, 均衡交易成本  $c^*$  时式 (17) 成立. 由于交易成本  $c$  的上限满足  $\frac{c-c_h}{h-p} < |\Delta_s|$ , 当  $c$  为上限  $\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) = |\Delta_s|$  时左边为 0, 而右边必然大于 0. 而当  $c = 0$  时, 右边式子对应消费者数量为 0 (因为右边表示等待时间), 而  $c = 0$  代入左边必然是大于 0 的. 结合增减性可知, 有且仅有一个交点. 接下来证明分时租赁的均衡线是关于  $c_h$  的减函数. 求导可证明, 当  $\left(\frac{h-p}{p-c_v}\right) > \frac{A_1^2}{A_2^2}$ , 等式左边随着  $c_h$  递减, 其中  $A_1 = g\left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) + g\left(-\frac{c-c_h}{h-p}\right)$  和  $A_2 = g(|\Delta_s|) + g(-|\Delta_s|)$ . 由于  $c^*(c_h)$  为增时, 均衡点也可能存在, 故  $\left(\frac{h-p}{p-c_v}\right) > \frac{A_1^2}{A_2^2}$  为充分条件. 该条件下, 随  $c_h$  增加, 图 1(a) 中减曲线向下移, 故均衡线为减函数 ( $c^*$  随着  $c_h$  递减).

最后上文已证明  $\left(\frac{h-p}{p-c_v}\right) > \frac{A_1^2}{A_2^2}$  时均衡线为一增一减, 故只需证明两均衡线存在交点即可. 首先在  $c_h = 0$  且  $c = 0$  处, 网约车均衡等式(18)成立, 故该点是网约车均衡点. 又由于网约车的均衡线为增函数, 故对于  $c > 0$ , 均衡的  $c_h^*$  必然大于0. 而对于分时租赁均衡线, 当  $c_h = 0$  时, 分时租赁的均衡交易成本  $c^*$  必然大于0(因为若  $c^* = 0$ , 式(17)右边必然为0, 但左边大于0, 故该点必不是均衡点). 故  $c_h = 0$  时, 分时租赁均衡线一定在图1(c)的正轴上. 又由于  $c^*(c_h)$  是减函数, 故  $c = 0$  时, 一定有  $c_h > 0$ . 因此  $\left(\frac{h-p}{p-c_v}\right) > \frac{A_1^2}{A_2^2}$  时两均衡线一定有且仅有一个均衡点.

另外, 根据式(17)和式(18)以及命题1, 可知均衡下消费者分别在短里程和中等里程时选择网约车与分时租赁, 里程较大(超过临界里程)时购车. 又由上述证明, 均衡不可能存在于  $c_h = 0$  或  $c = 0$  处, 故各模式是共存关系. 综上, 各模式间是互补共存关系(里程关系上互补). 又由于  $c < c_h$  使式(18)左边为负, 这不可能是均衡点, 所以均衡必然使  $c > c_h$ , 这说明网约车与分时租赁分层关系是相对稳定的. 证毕.

## 附录5

### 推论3的证明:

根据假设, 车辆的增加仅能改变系统的等待时间, 而无法直接改变参与意愿. 根据式(17)和附录4, 均衡存在时交易成本的下降能增加分时租赁的愿意参与人数但存在上限(因交易成本变化存在上限, 图像上也可看出). 由于分时租赁交易成本不可能低于网约车(附录3从反证法证明, 而且由式(18), 若  $c < c_h$ , 该式左边为负不可能是均衡点), 故分时租赁交易成本的下界为  $c = c_h$ . 根据式(17)左边为减函数, 故代入  $c = c_h$ , 愿意参与分时租赁的人数上限为  $\bar{m} = \frac{2(f/N - c_h + \sqrt{(p-c_v)N(v-c_v)\sigma^2 + (c_h-f/N)^2})}{(p-c_v)}$ . 只有  $n < \bar{m}$  时, 车辆数才有可能少于消费者数, 此时消费者间才可能存在合并效应.

与没有网约车的情况相比, 由于网约车的存在会使得分时租赁短里程用户减少(竞争效应), 但增加中等里程用户(延迟效应). 增加的消费者数量为  $\int_{|\Delta|}^{|\Delta|} g(l) dl$ , 而减少的消费数量为  $\int_0^{\frac{c-c_h}{h-p}} g(l) dl$ , 利用中值定理两者可表示为  $g(\xi_4)(|\Delta_s| - |\Delta|)$  和  $g(\xi_5) \frac{c-c_h}{h-p}$ . 由于短里程出行比例明显高于中长里程, 故  $g(\xi_4) < g(\xi_5)$ . 又  $|\Delta_s| - |\Delta| - \left(\frac{c-c_h}{h-p}\right) < 0$ , 故网约车的存在使得分时租赁总消费者数量减少( $l$  取负时情况也是如此, 不赘述). 因此, 当网约车不存在时, 若分时租赁存在合并效应, 不能说明网约车存在时分时租赁也存在合并效应, 但是反过来是成立的. 故  $\int_{-|\Delta|}^{|\Delta|} g(l) dl > n$  是分时租赁存在合并效应的必要条件. 利用中值定理不等式为  $2g(\xi)|\Delta| > n$ , 故得到如下等式  $\frac{f/N - c^* + \sqrt{(p-c_v)N(v-c_v)\sigma^2 + (c^*-f/N)^2}}{(p-c_v)} > \frac{n}{2g(\xi)}$ . 根据上式进行整理, 可以得到  $c^* < f/N - \frac{(p-c_v)n^2 - 4N(v-c_v)\sigma^2 g(\xi)^2}{4ng(\xi)}$  (该式反映参与意愿, 即愿意接受的交易成本).

又由于均衡状态下, 且当参与人数恰好为  $n$  时,  $c^* = \frac{kn(1+\gamma^2)}{2\mu(\mu-kn)}$ . 将该式代入得  $\frac{kn(1+\gamma^2)}{2\mu(\mu-kn)} < f/N - \frac{(p-c_v)n^2 - 4N(v-c_v)\sigma^2 g(\xi)^2}{4ng(\xi)}$ . 证毕.