

基于社会福利最大化的网约车平台定价模型研究

彭 向¹, 胡天宇², 孙俊芳¹, 张 勇²

(1. 苏州大学 东吴商学院, 苏州 215006; 2. 苏州大学 轨道交通学院, 苏州 215131)

摘 要 面向网约车平台、司机和乘客三方, 利用生灭过程理论及排队论描述了网约车平台中司机状态(空闲-繁忙)转化过程; 将网约车价格及平台和司机间的收入分成作为决策变量, 建立了司机愿意运营、乘客愿意乘坐的网约车供给与需求函数. 在此基础上, 面向静态定价策略和动态定价策略, 从政府监管角度建立了社会福利最大化模型及其求解算法. 为了确保模型能指导或监管网约车平台定价及分成, 证明了网约车平台市场均衡的存在性, 对比了静态和动态 2 种定价策略在不同市场规模下的社会福利值. 研究结果表明, 当市场规模有限时, 基于动态定价策略的社会福利始终大于等于静态定价的社会福利; 当市场规模趋于无限大时, 这 2 种定价策略的社会福利是相等的. 本文所建模型不仅能求解网约车平台的静态和动态最优定价及其分成系数, 还能揭示平均乘车时间、司机和乘客选择网约车行为对平台定价策略的影响, 从而为网约车平台定价及其监管提供理论依据.

关键词 网约车; 静态定价; 动态定价; 排队论; 社会福利

Pricing of ridesourcing platform with maximizing social welfare

PENG Xiang¹, HU Tianyu², SUN Junfang¹, ZHANG Yong²

(1. Dongwu Business School, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. School of Railway Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, China)

Abstract For tripartite agents of online ridesourcing platform, drivers and passengers, the queuing theory and the birth and death process theory are used to describe the driver state transition process (idle-busy) in the car-hailing platform. With the ridesourcing price and revenue sharing between ridesourcing platform and driver as decision variables, the supply and the demand functions of driver's willingness to join the ridesourcing operation and the passengers' willingness to ride are both proposed. On this basis, the ridesourcing platform pricing models to maximize the social welfare under the static pricing strategy and the dynamic pricing strategy, are both proposed from angle of government regulation, and the algorithm for solving the model is also designed; In order to ensure that the theoretical model results be able to guide or supervise the pricing of the ridesourcing platform, the existence of market equilibrium of ridesourcing platform are proved, and the social welfares of static pricing strategy and the dynamic pricing strategy are compared. The research results show that the social welfare under dynamic pricing strategy is greater than the one of static pricing strategy under finite market size, while the social welfares under the dynamic and the static pricing strategy is equal under the large-market limit. The proposed model can not only solve the static and the dynamic optimal prices of ridesourcing platform, but also investigate the impacts of

收稿日期: 2019-11-15

作者简介: 彭向 (1981-), 女, 副教授, 研究方向: 产业经济学、市场定价理论, E-mail: sinkey@126.com; 胡天宇 (1995-), 女, 江苏如皋人, 硕士研究生, 研究方向: 交通运输规划与管理, 网约车平台定价策略研究, E-mail: 1797503151@qq.com; 通信作者: 孙俊芳 (1987-), 女, 湖北五峰人, 副教授, 博士, 研究方向: 产业经济学、市场定价理论, E-mail: jfsun@suda.edu.cn; 张勇 (1978-), 男, 江苏如东人, 副教授, 研究方向: 交通运输规划与管理, 网约车平台定价策略研究, E-mail: sinkey@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (61773293); 国家社科基金重大项目 (13&ZD175); 国家社会科学基金 (18CJY026, 19BJY108)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61773293); Major Program of National Social Science of China (13&ZD175); National Social Science Foundation of China (18CJY026, 19BJY108)

中文引用格式: 彭向, 胡天宇, 孙俊芳, 等. 基于社会福利最大化的网约车平台定价模型研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(7): 1806-1818.

英文引用格式: Peng X, Hu T Y, Sun J F, et al. Pricing of ridesourcing platform with maximizing social welfare[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(7): 1806-1818.

average ride time, the behavior of drivers and passengers choosing ridesourcing platform on pricing of the ridesourcing platform, thus provide theoretical foundation for the pricing and supervision of ridesourcing platform.

Keywords ridesourcing; static pricing; dynamic pricing; queuing theory; social welfare

1 引言

网约车是基于移动互联网预约小汽车提供门到门的出行服务^[1]。以2017年为例,滴滴平台为中国400多个城市的4.5亿用户提供了超过74.3亿次的移动出行服务^[2]。网约车已经成为一种重要的出行方式。然而,不同于普通出租车的定价机制,网约车价格往往依据区域内供需强度采用动态的定价策略,因此造成政府对网约车价格难以有效监管。由于网约车平台定价波动将对乘客和网约车的供需双方产生较大影响,有可能造成运能浪费、乘客投诉票价过高或网约车司机无利可图等,最终出现“无车可乘”、“无人乘车”的资源浪费现象。因此,有必要分析网约车价格生成机制和平台定价策略,为政府监管价格这只“看不见的手”在市场上的调节作用提供决策依据。

由于网约车市场供需由定价决定,故网约车平台定价成为研究的焦点。首先,针对网约车平台定价问题, Fellows等^[3]从成本角度证明了合理的网约车平台定价可以为社会带来很高的净收益,有利于减少成本,提高总体社会福利;而常缨征^[4]认为网约车平台连接着乘客和司机,其价格结构会对出行效用及社会福利产生影响,并指出网约车存在扰乱市场价格秩序的问题。上述探索的结论存在一定的矛盾。为此, Schwieterman等^[5]收集了美国80个城市的小时费率,实证分析了美国网约车价格对供需的影响,研究发现税收将影响网约车定价,对社会福利有反作用的影响。其次,网约车平台是一个典型的双边市场, Aloui等^[6]基于双边市场理论研究了网约车垄断平台的最优定价,表明平台定价取决于双方价格需求弹性的相对大小。但是该研究并未进一步揭示网约车价格对平台利润的影响。对此, Bimpikis^[7]从平台利润最大化角度,研究发现采用价格歧视方式定价,平台利润、消费者剩余在供需平衡时是单调的且需求在空间上达到“均衡”时获得最大化。值得注意的是,为了能揭示动态定价对乘客或乘客剩余的影响,现有研究^[8-10]往往引入行为经济学方法来量化动态定价对乘客剩余的影响。基于移动互联网的网约车的一个最显著特征是能实时调整价格,因此动态定价成为网约车研究的核心问题。然而,上述研究尽管讨论了网约车市场特征,也结合供给和需求研究了均衡定价的优势或必要性,但并未涉及到网约车价格对司机及乘客是否选择网约车的影响,也没有涉及到网约车出行需求(距离、时间等)的随机性,更未提出能指导定价实践应用的具体优化模型。

针对网约车动态定价问题, Zha等^[11]基于双边市场理论建立了双层规划模型研究了动态和静态定价对供给的影响,研究表明动态定价能实现平台和司机的更高收入,但乘客剩余较少。由于网约车平台总是通过动态定价来实现其经济目标,具体包括最小化乘客总票价^[12]和运营成本^[13,14],最大化收入^[15-17]等。随着研究的深入,王汉斌等^[18]考虑网约车平台线上运能与线下运能的线性关系,构建政府指导定价策略模型。在此基础上, Wang等^[19]结合双边市场理论和出租车市场理论,定量评估了网约车平台定价策略对出租车市场绩效的影响。但该定价模型仅能研究静态定价策略,无法描述需求和供给随着时间变化的情况下,平台订单量及价格随着时间变化的情形。因此, Luo等^[20]利用连续时间空间方法研究网约车中的动态定价问题,并通过群间传递描述动态供给模型,获得平台收益最大化的最优动态价格。这个研究为处理网约车和类似匹配市场中复杂的时空定价问题提供了宏观的视角。然而,上述研究仍然无法描述网约车市场的随机性,且未考虑定价策略与乘客需求、司机供给及平台三者之间的相互影响。基于这两点,上述定价模型均无法研究网约车平台定价的实时变化情况。

针对上述不足, Banerjee等^[21]引入司机与乘客的心理价格曲线,基于排队论模拟市场中乘客和司机的流动过程,研究了网约车平台利润最大化的静态定价与动态定价策略,讨论了平台的成交量及收入。赵道致等^[22]针对网约车服务与出租车服务共存的出行市场,考虑网约车平台提供高端服务或低端服务,面向参与与公平提出了管制策略的制定方法。必须指出,上述模型无一例外地以平台利润最大化为研究目标。而网约车由于联系着平台、司机和乘客三者的利润关系,仅考虑平台利润最大化难以兼顾网约车司机及乘客的利益,极易产生“无车可乘”、“无人乘车”现象,从而为政府监管带来舆论压力;此外,以往的研究要么未涉及平台

与司机的收益分成, 要么假定是固定的. 这与实际情况不符合. 这也是现有网约车平台定价研究的一个缺陷. 故而上述研究仍然与现实存在较大差异.

对此, 本文采用排队论的方法来模拟司机和乘客的交易状态. 在网约车平台上, 乘客能实时掌握乘车价格故对乘车价格敏感. 如果价格过高, 价格敏感的客户会放弃乘坐网约车. 另一方面, 司机因能实时了解承运价格而敏感. 本文对以往研究成果做了进一步的拓展, 具体包括: ①将从政府的角度, 而非平台角度, 研究基于社会福利最大化的网约车平台定价问题; ②结合静态定价和动态定价策略调整平台给司机的分成系数, 从而建立分成系数及平台定价一体化的控价机制; ③探索社会福利最大化的网约车定价模型解的性质, 从理论上揭示网约车定价的可行性; ④将所建立的定价模型作为分析工具, 展现其在网约车平台定价中的初步应用.

2 基本模型

2.1 假设及问题描述

本文假定网约车市场由 3 方构成: 网约车平台、司机、乘客. 首先假设司机利用网约车 APP 开始接单或运营时, 才将他们纳入网约车平台. 另外假设每个乘客是异质的, 只有在他们使用网约车 APP 下订单时才纳入网约车平台中. 将司机、乘客及网约车平台抽象为如图 1 所示的排队系统. 根据图 1, 司机完成 1 次送客任务后, 将比较心理价格预期与当前价格决定是否要进行下一次的载客任务: 如果价格高于心理价位, 则继续留在平台等待下个载客订单; 否则离线网约车 APP 则离开平台, 不再接受新的载客订单. 为此, 本文假定空闲司机到达速率满足 λ 的泊松分布, 新司机以外生速率 λ^e 加入可用司机的队列, 乘客到达过程也满足泊松分布, 其速率 $\mu(A) > 0$, A 为平台上空闲司机的数量, 假定乘客平均出行时间长度为 τ . 当司机完成载客服务时, 部分司机都会以概率 $q_{\text{exit}} > 0$ 退出系统, 其余司机返回到可用司机的队列. 其中司机离开系统的概率 q_{exit} 是由网约车平台中供给和需求的变化决定的, 与乘客和司机心理预期价格分布相关.

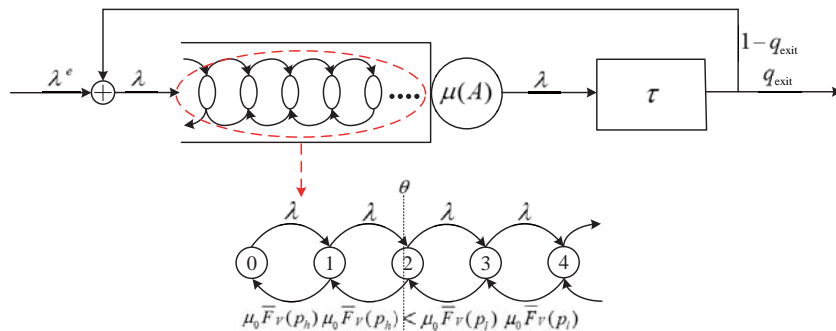


图 1 平台中司机的生灭过程

本文考虑两种网约车平台定价机制. 其一为静态定价, 即平台只设置单一价格, 即在价格保持固定的前提下, 平台参数 (到达率, 需求/供应弹性) 均为固定的. 对此, 假设乘客每次乘坐价格为 p (单位公里定价), 平台则支付司机 γp , 其中 γ 为分成系数, 剩余部分为平台的收入. 其二为动态定价, 即平台根据系统中可用的司机数量设置价格. 该定价策略设置三个参数: 低价格 p_l , 高价格 p_h 和空闲司机数量阈值 θ . 从图 1 的生灭模型可以看出, 当平台中的司机数 $A \geq \theta$ (这里 $\theta = 2$) 时, 平台定价 $P(A) = p_l$, 当 $A < \theta$ 时, $P(A) = p_h$. 平台则支付司机 $\gamma P(A)$. 需要说明的是, 静态定价时相对动态定价而言的: 静态定价为针对平台上空闲司机数量平稳时确定的价格; 而动态定价则根据空闲司机瞬间数量确定的价格.

对乘客而言, 假设乘客是否乘坐网约车的接受价格服从于 F_V 分布, V 是每个乘客的心理预期价格. 当 $V \geq p$ 时, 乘客愿意乘车; 否则放弃; 对司机而言, 假设司机独立于 F_C 分布, C 是每位司机的心理预期收入, 当 $\frac{\gamma p}{\tau} \geq C$ 时, 司机选择接单, 否则放弃. 假设潜在的乘客到达率为 μ_0 , 则实际的乘客到达率为

$$\mu = \mu_0 \bar{F}_V(p) = (1 - F_V(p)) \mu_0. \quad (1)$$

假设 L 为每次乘坐的预期空闲时间, I 为每次乘坐的预期收入, λ_0 为潜在的司机进入系统的到达率, 则当队列稳定时, 存在:

$$\lambda^e = \lambda q_{\text{exit}} = \lambda_0 F_C \left(\frac{I}{L + \tau} \right). \quad (2)$$

2.2 社会福利

政府部门作为监管方, 其追求的目标是社会福利最大化 (以 W 表示). 它被定义为乘客剩余 (以 S 表示)、司机剩余 (以 D 表示)、平台净收入 (以 T 表示) 三者之和, 即:

$$W = S + D + T. \quad (3)$$

乘客剩余为乘客愿意支付的价格减去乘客实际支付的价格, 根据 Banerjee 等^[21] 可知, 交易量即为稳态下成功匹配的比率, 由平衡时的 $\lambda(\gamma, p)$ 给出, 则乘客的总体剩余为:

$$S = \lambda(\gamma, p) \frac{1}{\bar{F}_V(p)} \int_p^\infty (V - p) f_V(V) dV. \quad (4)$$

司机剩余为司机实际的收入减去司机心理预期的收入及司机成本 D_C (油耗、车损等), 即:

$$D = \lambda(\gamma, p) \left[\frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p}{\tau}} \left(\frac{\gamma p}{\tau} - C \right) f_C(C) dC - D_C \right]. \quad (5)$$

平台净收入为平台总收入扣除平台支付给司机的收入及平台成本 T_C (运营成本等), 即:

$$T = \lambda(\gamma, p) [(1 - \gamma)p - T_C]. \quad (6)$$

根据公式 (3)~(6), 则社会福利为:

$$W = \lambda(\gamma, p) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p)} \int_p^\infty (V - p) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p}{\tau}} \left(\frac{\gamma p}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma)p - D_C - T_C \right]. \quad (7)$$

2.3 静态定价模型

2.3.1 社会福利最大化

首先探讨静态定价下的社会福利最大化问题. 鉴于网约车价格决定了网约车的供需两方面, 因此本文将 (2) 式改写为以价格 p 为自变量的函数. 由于司机预期的收入为 γp , $L(\gamma, p) = 1/(\mu_0 \bar{F}_V(p) - \lambda(\gamma, p))$, 且 $\mu_0 \bar{F}_V(p) > \lambda(\gamma, p)$, 所以公式 (2) 可以改写为:

$$\lambda^e(\gamma, p) = \lambda(\gamma, p) q_{\text{exit}} = \lambda_0 F_C \left(\frac{\gamma p}{\tau + (\mu_0 \bar{F}_V(p) - \lambda(\gamma, p))^{-1}} \right). \quad (8)$$

与此同时, 令 $\lambda(\gamma, p, n)$ 表示网约车数量 n 时的系统状态下平台定价为 p , 分成系数为 γ 的平衡司机到达率. 根据 Banerjee 等^[21] 可知:

$$\lambda(\gamma, p, n) = n \cdot \min \left[\lambda_0 F_C \left(\frac{\gamma p}{\tau} \right) / q_{\text{exit}}, \mu_0 \bar{F}_V(p) \right] - o(n). \quad (9)$$

在以下研究中, 为了简化网约车数量 n 对结果的影响, 下文假定平台上网约车的数量 (不是可用网约车数量) 不会制约乘客的乘车需求量, 故假设 $n \rightarrow \infty$ 的大市场极限条件下, 利用平衡司机到达率 $\hat{\lambda}(\gamma, p)$ 来研究平稳状态下的社会福利最大化. 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda(\gamma, p, n)}{n} \rightarrow \min \left[\lambda_0 F_C \left(\frac{\gamma p}{\tau} \right) / q_{\text{exit}}, \mu_0 \bar{F}_V(p) \right] \triangleq \hat{\lambda}(\gamma, p).$$

针对上述情况, 静态定价下社会福利最大化模型可以表述为:

$$\max W = \hat{\lambda}(\gamma, p) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p)} \int_p^\infty (V - p) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p}{\tau}} \left(\frac{\gamma p}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma)p - D_C - T_C \right] \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad \hat{\lambda}(\gamma, p) = \min \left[\lambda_0 F_C \left(\frac{\gamma p}{\tau} \right) / q_{\text{exit}}, \mu_0 \bar{F}_V(p) \right], \quad (11)$$

$$0 \leq \gamma \leq 1, \quad (12)$$

$$p \geq 0. \quad (13)$$

2.3.2 网约车市场均衡的存在性

模型 (10)~(13) 确定的是理论上的网约车静态定价. 如果该模型的解不存在, 这就意味着该模型无法指导网约车平台定价. 为此有必要考察网约车市场均衡的存在性, 证明静态定价策略下社会福利最大化的最优价格和分成系数存在性. 本文提出如下定理:

定理 1 考虑具有 $(\lambda_0, \mu_0) \in \mathbb{R}_+^2$, $(\gamma, q_{\text{exit}}) \in (0, 1)^2$ 和连续分布 F_C, F_V, f_C, f_V , 网约车平台在实行静态定价的策略下, 一定存在最优的价格 p 和分成系数 γ 使社会福利达到最大化.

证明 本文运用布劳威尔不动点定理^[21,23]来证明均衡解的存在性. 证明分为两步: 首先定义一个紧集和凸集, 其次证明函数的连续性, 从而证明方程解的存在性. 第一步, 定义多面体 $H = \{(\gamma, p) | 0 \leq \gamma \leq M_1, 0 \leq p \leq M_2\}$, 其中 M_1 和 M_2 是一个较大的实数值, 可见集合 H 是紧凑和凸的; 第二步, 证明方程 (10) 的连续性: 根据连续性的基本定义, 设函数 $y = f(x)$ 在点 x_0 的某一领域内有定义, 如果 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta y = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)] = 0$, 则称 $y = f(x)$ 在点 x_0 连续, 取 p_1 和 γ_1 为函数定义域中任意两点, 并给以 p, γ 以增量 $\Delta p, \Delta \gamma$, 则有

$$\begin{aligned} \lim_{\substack{\Delta \gamma \rightarrow 0 \\ \Delta p \rightarrow 0}} \Delta y &= \lim_{\substack{\Delta \gamma \rightarrow 0 \\ \Delta p \rightarrow 0}} [f(\gamma_1 + \Delta \gamma, p_1 + \Delta p) - f(\gamma_1, p_1)] \\ &= \lim_{\substack{\Delta \gamma \rightarrow 0 \\ \Delta p \rightarrow 0}} \left(\min \left[\lambda_0 F_C \left(\frac{(\gamma_1 + \Delta \gamma)(p_1 + \Delta p)}{\tau} \right) \right] / q_{\text{exit}}, \mu_0 \bar{F}_V(p_1 + \Delta p) \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_1 + \Delta p)} \int_{p_1 + \Delta p}^{\infty} (V - p_1 - \Delta p) f_V(V) dV + \right. \\ &\quad \left. \frac{\tau}{F_C(\frac{(\gamma_1 + \Delta \gamma)(p_1 + \Delta p)}{\tau})} \int_0^{\frac{(\gamma_1 + \Delta \gamma)(p_1 + \Delta p)}{\tau}} \left(\frac{(\gamma_1 + \Delta \gamma)(p_1 + \Delta p)}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma_1 - \Delta \gamma)(p_1 + \right. \\ &\quad \left. \Delta p) - D_C - T_C \right] - \min \left[\lambda_0 F_C \left(\frac{\gamma_1 p_1}{\tau} \right) / q_{\text{exit}}, \mu_0 \bar{F}_V(p_1) \right] \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_1)} \int_{p_1}^{\infty} (V - p_1) f_V(V) dV + \right. \\ &\quad \left. \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma_1 p_1}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma_1 p_1}{\tau}} \left(\frac{\gamma_1 p_1}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma_1) p_1 \right] - D_C - T_C \Big). \end{aligned} \quad (14)$$

由于 $0 \leq \gamma \leq 1, p \geq 0, F_C, F_V, f_C, f_V$ 为连续分布, 则 $\bar{F}_V(p) \geq 0, F_C(\frac{\gamma p}{\tau}) \geq 0$, 故 $\lim_{\substack{\Delta \gamma \rightarrow 0 \\ \Delta p \rightarrow 0}} \Delta y = \lim_{\substack{\Delta \gamma \rightarrow 0 \\ \Delta p \rightarrow 0}} [f(\gamma_1 + \Delta \gamma, p_1 + \Delta p) - f(\gamma_1, p_1)] = 0$.

由此可知, 上述函数在集合 H 中是连续的. 根据布劳威尔不动点定理可知, 该函数在集合 H 内必有一解, 即静态定价下该模型在定义域内必能找出一种定价策略保证社会福利实现最大化.

2.4 动态定价模型

2.4.1 社会福利最大化

在动态定价下, 本文考虑单阈值定价策略 (p_l, p_h, θ) , 参数设置如前所述. 为了方便起见, 本文定义 $\phi_h = 1/\bar{F}_V(p_h), \phi_l = 1/\bar{F}_V(p_l), \rho = \lambda/\mu_0$, 根据 2.1 节的分析, 司机到达率 $\hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h)$ 满足: ①当 $p_l > p_{\text{bal}}$ 时, $\hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) = \mu_0 \bar{F}_V(p_l)$, ②当 $p_h < p_{\text{bal}}$ 时, $\hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) = \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C(\frac{\gamma p_h}{\tau})$, ③当 $p_l \leq p_{\text{bal}} \leq p_h$ 时, $\hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) = \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C \left\{ \frac{\gamma}{\tau} \left\{ \frac{p_l [\phi_h - \mu_0 / \hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h)] + p_h [\mu_0 / \hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) - \phi_l]}{\phi_h - \phi_l} \right\} \right\}$, 其中定义 p_{bal} 为平台中乘车需求等于司机供给的平衡价格, 表示为 $\mu_0 \bar{F}_V(p_{\text{bal}}) = \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau})$.

针对上述情况, 动态定价下社会福利最大化模型可以表述为:

$$\max W = \begin{cases} \mu_0 \bar{F}_V(p_l) f(p_l), & p_l > p_{\text{bal}} \\ \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C \left(\frac{\gamma p_h}{\tau} \right) f(p_h), & p_h < p_{\text{bal}} \\ \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C \left(\frac{\gamma P}{\tau} \right) f(P), & p_l \leq p_{\text{bal}} \leq p_h \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq \gamma \leq 1, \quad (16)$$

$$p_l \geq 0, \quad (17)$$

$$p_h \geq 0, \quad (18)$$

其中, $f(x) = \left[\frac{1}{\bar{F}_V(x)} \int_x^{\infty} (V - x) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma x}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma x}{\tau}} \left(\frac{\gamma x}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma)x - D_C - T_C \right]$, $P = \frac{p_l [\phi_h - \mu_0 / \hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h)] + p_h [\mu_0 / \hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) - \phi_l]}{\phi_h - \phi_l}$.

2.4.2 网约车市场均衡的存在性

同样地, 如果模型 (15)~(18) 的解不存在, 该模型则无法指导网约车平台动态定价. 本节主要是考察网约车市场动态定价均衡的存在性, 证明动态定价策略下社会福利最大化最优价格和分成系的存在性. 为此本文提出定理:

定理 2 考虑具有 $(\lambda_0, \mu_0) \in \mathbb{R}_+^2, (\gamma, q_{\text{exit}}) \in (0, 1)^2$ 和连续分布 F_C, F_V, f_C, f_V , 网约车平台在实行动态定价的策略下, 一定存在最优的价格 p_l, p_h 和分成系数 γ 使社会福利达到最大化, 当且仅当它满足以下两个条件:

$$\begin{aligned} & \mu_0 \bar{F}_V(p_{\text{bal}}) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_{\text{bal}})} \int_{p_{\text{bal}}}^{\infty} (V - p_{\text{bal}}) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau}} \left(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma) p_{\text{bal}} - D_c - T_c \right] \\ &= \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C \left(\frac{\gamma P}{\tau} \right) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(P)} \int_P^{\infty} (V - P) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma P}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma P}{\tau}} \left(\frac{\gamma P}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma) P - D_c - T_c \right], \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $P = \frac{(p_{\text{bal}} - p_h) \{ \hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) - \mu_0 [1 - F_V(p_h)] [1 - F_V(p_{\text{bal}})] \}}{\hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) [F_V(p_h) - F_V(p_{\text{bal}})]}$.

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C \left(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau} \right) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_{\text{bal}})} \int_{p_{\text{bal}}}^{\infty} (V - p_{\text{bal}}) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau}} \left(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma) p_{\text{bal}} - D_c - T_c \right] \\ &= \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C \left(\frac{\gamma P}{\tau} \right) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(P)} \int_P^{\infty} (V - P) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma P}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma P}{\tau}} \left(\frac{\gamma P}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma) P - D_c - T_c \right], \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $P = \frac{(p_l - p_{\text{bal}}) \{ \hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) - \mu_0 [1 - F_V(p_{\text{bal}})] [1 - F_V(p_l)] \}}{\hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) [F_V(p_{\text{bal}}) - F_V(p_l)]}$.

证明 证明分段函数的连续性, 首先要证明各分段的连续性, 证明过程与静态定价类似; 其次证明断点处的连续性: 即证明在断点处左右极限相等, $\lim_{p_l^- \rightarrow p_{\text{bal}}} M = \lim_{p_l^+ \rightarrow p_{\text{bal}}} M$, $\lim_{p_h^- \rightarrow p_{\text{bal}}} M = \lim_{p_h^+ \rightarrow p_{\text{bal}}} M$, 由于计算过程比较复杂, 所以本文只能得出满足各个连接点处需要满足的条件公式:

$$\begin{aligned} & \lim_{p_l^- \rightarrow p_{\text{bal}}} M = \lim_{p_l^+ \rightarrow p_{\text{bal}}} M \\ & \mu_0 \bar{F}_V(p_{\text{bal}}) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_{\text{bal}})} \int_{p_{\text{bal}}}^{\infty} (V - p_{\text{bal}}) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau}} \left(\frac{\gamma p_{\text{bal}}}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma) p_{\text{bal}} - D_c - T_c \right] \\ &= \frac{\lambda_0}{q_{\text{exit}}} F_C \left(\frac{\gamma P}{\tau} \right) \left[\frac{1}{\bar{F}_V(P)} \int_P^{\infty} (V - P) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma P}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma P}{\tau}} \left(\frac{\gamma P}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma) P - D_c - T_c \right], \end{aligned} \quad (21)$$

其中 $P = \frac{(p_{\text{bal}} - p_h) \{ \hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) - \mu_0 [1 - F_V(p_h)] [1 - F_V(p_{\text{bal}})] \}}{\hat{\lambda}(\gamma, p_l, p_h) [F_V(p_h) - F_V(p_{\text{bal}})]}$.

另一断点处连续性证明与上述过程类似, 在此不再赘述. 由此可知, 在满足上述两个条件下, 函数在约束条件下是连续的. 根据布劳威尔不动点定理可知, 该函数在约束条件内必有一解, 即动态定价下, 该模型在定义域内必能找出一种定价策略保证社会福利实现最大化.

2.5 动态定价与静态定价对比分析

本节主要考察动态定价和静态定价在实现社会福利最大化方面的适应性. 由于双边市场本身的规模对供需双方的匹配动机和选择行为具有重要的影响. 网约车平台市场作为典型的双边市场, 其市场规模 (本文中以网约车平台的共享车数量来表征) 也可能对网约车和乘客的匹配产生重要影响, 因此也可能影响社会福利. 对于网约车静态与动态定价策略, 考虑不同的市场规模提出如下定理:

定理 3 考虑具有 $(\lambda_0, \mu_0) \in \mathbb{R}_+^2, (\gamma, q_{\text{exit}}) \in (0, 1)^2$ 和连续分布 F_C, F_V, f_C, f_V , 网约车平台实行动态定价策略获得的社会福利始终大于等于静态定价策略获得的社会福利; 当处于大市场极限下 (即当运营车辆趋

于无穷大), 实行动态定价策略获得的社会福利等于静态定价策略获得的社会福利.

证明 假设 W_D 为实行动态定价策略下的社会福利, W_S 为实行静态定价策略下的社会福利, $Z = W_D - W_S$. 两者的社会福利取决于定价. 为此本文分 $p_l > p_{bal}$ 、 $p_h < p_{bal}$ 与 $p_l \leq p_{bal} \leq p_h$ 一共 3 种情况讨论.

当 $p_l > p_{bal}$ 时,

$$Z = W_D - W_S = [\mu_0(n)\bar{F}_V(p_l) - \lambda(\gamma, p_l, n)] \left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_l)} \int_{p_l}^{\infty} (V - p_l) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p_l}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p_l}{\tau}} \left(\frac{\gamma p_l}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma)p_l - D_c - T_c \right]. \quad (22)$$

因为 $\lambda(\gamma, p_l, n) < \mu_0(n)\bar{F}_V(p_l)$ (排队论中的服务台服务速率大于顾客到达率), 且

$$\left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_l)} \int_{p_l}^{\infty} (V - p_l) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p_l}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p_l}{\tau}} \left(\frac{\gamma p_l}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma)p_l \right] > 0, \quad (23)$$

故 $Z > 0$. 所以在一般条件下网约车平台实行动态定价策略获得的社会福利大于静态定价策略获得的社会福利.

但是在市场极限下, 平台成交量 $\hat{\lambda}(\gamma, p_l) \triangleq \min[\frac{\lambda_0}{q_{exit}} F_C(\frac{\gamma p_l}{\tau}), \mu_0 \bar{F}_V(p_l)]$, 其中 $\frac{\lambda_0}{q_{exit}} F_C(\frac{\gamma p_l}{\tau})$ 为平台中的司机供给量, 是单调递增的, $\mu_0 \bar{F}_V(p_l)$ 为乘客需求量, 是单调递减的. 且 $\frac{\lambda_0}{q_{exit}} F_C(\frac{\gamma p_{bal}}{\tau}) = \mu_0 \bar{F}_V(p_{bal})$, 当 $p_l > p_{bal}$ 时, 平台成交量 $\hat{\lambda}(\gamma p_l)$ 是由乘客需求决定的, 即 $\hat{\lambda}(\gamma p_l) = \mu_0 \bar{F}_V(p_l)$. 又因为

$$\left[\frac{1}{\bar{F}_V(p_l)} \int_{p_l}^{\infty} (V - p_l) f_V(V) dV + \frac{\tau}{F_C(\frac{\gamma p_l}{\tau})} \int_0^{\frac{\gamma p_l}{\tau}} \left(\frac{\gamma p_l}{\tau} - C \right) f_C(C) dC + (1 - \gamma)p_l \right] > 0, \quad (24)$$

故 $Z = 0$. 所以在市场极限下, 动态定价获得的社会福利等于静态定价获得的社会福利. 而 $p_h < p_{bal}$ 与 $p_l \leq p_{bal} \leq p_h$ 这两种情况的证明过程与上述过程类似, 受篇幅限制在此不再赘述.

注: 定理 3 表明, 当网约车平台的市场供需规模不大 (即网约车数量 n 并未趋于无穷大) 时, 此时网约车平台实行动态定价策略获得的社会福利始终大于等于静态定价策略获得的社会福利. 随着网约车市场供给不断扩大, 理论上如果其趋于无穷大, 根据动态定价机制, 此时平台均衡价格即为 p_l 价格, 阶梯定价机制失效. 此时动态定价机制实际上“退化”为静态定价机制. 因此, 动态定价策略获得的社会福利等于静态定价策略获得的社会福利. 值得注意的是, 由于网约车供给规模本身是难以趋于无穷大的, 因此现实中动态定价策略获得的社会福利总是大于静态定价策略的.

3 算例分析

为了体现上述模型的有效性, 本节主要进行了给出两个算例. 第一个数值算例揭示定价策略与平台相关特征参数之间的关系; 第二个以若干实际城市为算例考察模型在实践的应用, 评价与分析不同等级城市的定价策略. 模型 (10)~(13) 和模型 (15)~(18) 属于有约束的非线性优化问题, 本文采用序列二次规划法^[24] 优化算法进行了求解. 该算法的思路是构造基于拉格朗日函数, 以一系列二次规划的解逼近规划问题的解. 限于篇幅限制, 算法过程本文不再赘述.

3.1 数值算例分析

3.1.1 算例设置

本节使用一个数值算例来验证文中所提出的模型和求解算法的有效性. 设某区域内网约车的潜在的司机进入系统的到达率 $\lambda_0 = 2500$ 辆/小时, 潜在的乘客到达率为 $\mu_0 = 5000$ 人/小时, 乘坐时间 $\tau = 0.5$ 小时, 司机离开系统的概率 $q_{exit} = 0.8$ (该参数是由平台中供给和需求变化决定的, 也可直接通过调查问卷得出, 为了简便计算, 给出上述参考值), 司机和乘客的心理价格预期分布 $F_V, F_C \sim N(3, 1)$, $D_c = 1.11$ 元/公里^[25], $T_c = 0.14p$ ^[26], 为了对比两种定价策略的优劣性, 所有基础参数设置均一致.

利用序列二次规划法^[24] 优化算法对上述算例进行了求解. 图 2 是静态定价和动态定价模型随迭代次数增加目标值的变化. 可以看到, 静态定价模型经过 12 次、动态定价模型在经过 8 次左右迭代后, 目标值均趋于稳定. 这表明上述求解算法有着较高的收敛性能和求解效率.

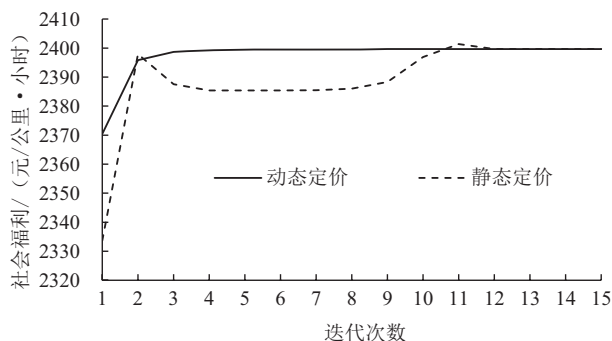


图2 静态定价和动态定价迭代过程

根据求解结果, 静态定价条件下, 最优的成交量 $\hat{\lambda}(p) = 2186$ 单/小时, 平台定价 $p = 3.16$ 元/公里·单, 分成系数 $\gamma = 0.56$, 最大社会福利 $W = 2400$ 元/公里·小时; 动态定价条件下, 最优分成系数 $\gamma = 0.56$, 平台定价低价格 $p_l = 2.18$ 元/公里·单, 平台定价高价格 $p_h = 3.16$ 元/公里·单, 最大社会福利 $W = 2400$ 元/公里·小时。由此可见, 在上述基础参数设置下, 动态定价所获得社会福利与静态定价获得社会福利相等, 满足定理3。

下面通过改变模型参数 (平均乘坐时间 τ , 司机离开系统概率 q_{exit} , 乘客/司机心理预期价格分布 F_V , F_C , 初始司机/乘客达到率 λ_0, μ_0 , 司机成本: 高成本 $D_H = 1.11$ 元/公里, 低成本 $D_S = 0.75$ 元/公里^[27], 其余参数与上述算例设置参数一致), 考察网约车在静态定价和动态定价策略下实现社会福利最大化的变化情况。

3.1.2 定价策略与平均乘坐时间的关系

由公式(2)可知, 平均乘坐时间对司机供给产生较大影响, 故网约车平台定价策略与平均乘坐时间紧密相关。图3(a)和3(b)给出的是静态定价和动态定价策略的成交量和社会福利与平均乘坐时间之间关系。根据图3(a)可以看出, 在静态定价策略下, 随着平均乘坐时间的增加, 平台成交量和社会福利却逐步减少, 这是根据公式(10)和(15)的定义, 乘坐时间对成交量和社会福利起反作用; 动态定价策略亦如此; 其次, 实行

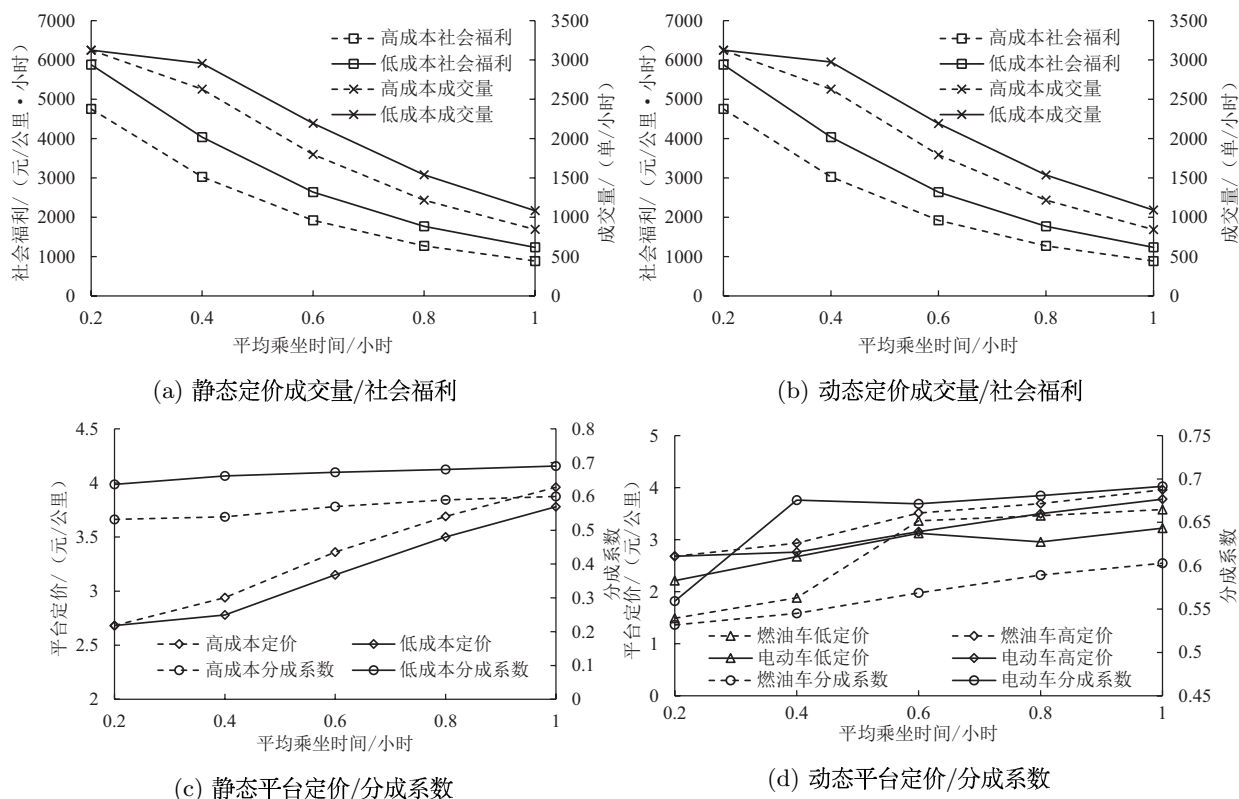


图3 定价策略与平均乘坐时间关系图

动态定价策略与静态定价策略得到的最大社会福利及成交量相等,验证了定理 3;与此同时,对比网约车司机的出行成本,成本越高,成交量和社会福利越小,这说明网约车市场要想获得更大的价格优势,必须要降低成本,如:采用成本较低的网约车品牌、给予司机相应的电话费补助或油费补助等等。

图 3(c) 和 3(d) 给出了静态定价和动态定价策略的平台定价和分成系数。从图中可以看出,对两种策略而言,平均乘坐时间的增加导致平台定价和分成系数增加。原因在于,出行时间的增加将减少司机供给,导致平台定价上升。另外根据图 3(c) 和 3(d) 还能发现,司机出行成本越低,平台定价越低,分成系数越高。这说明获社会福利不仅仅取决于司机的收入,实际上是平台、司机和乘客三方共同决定的。

3.1.3 定价策略与司机离开系统的概率的关系

司机离开系统的概率影响了平台中司机的供给量,故网约车平台的定价策略与司机的参与度息息相关,图 4(a) 和 4(b) 给出了实行静态定价和动态定价策略的成交量和社会福利与司机离开系统的概率之间的关系。从图 4(a) 中可以看出,在实行静态定价策略下,随着司机离开系统的概率增加,平台成交量和社会福利却逐步减少,这是由于在静态定价和动态定价模型中,司机离开系统的概率在分母上,对司机的供给量起反作用,故成交量和社会福利相应减少;动态定价策略亦如此;其次,实行动态定价策略与静态定价策略得到的最大社会福利及成交量相等,验证了定理 3;与此同时,对比网约车司机的出行成本,成本越高,成交量和社会福利越小。

图 4(c) 和 4(d) 代表实行静态定价和动态定价策略的平台定价和分成系数。由图可知,司机离开系统的概率越高,平台定价越高,这是由于司机供给量与司机离开系统的概率负相关,司机供给量的减少势必会引起平台定价的升高;高成本网约车的分成系数基本保持不变,而低成本网约车的分成系数在司机离开系统的概率较小时达到最大。这说明针对成本较低的网约车,如果给予司机较高的分成,司机离开系统的概率越低,平台中司机供给量越大,从而能获得较高的社会福利。

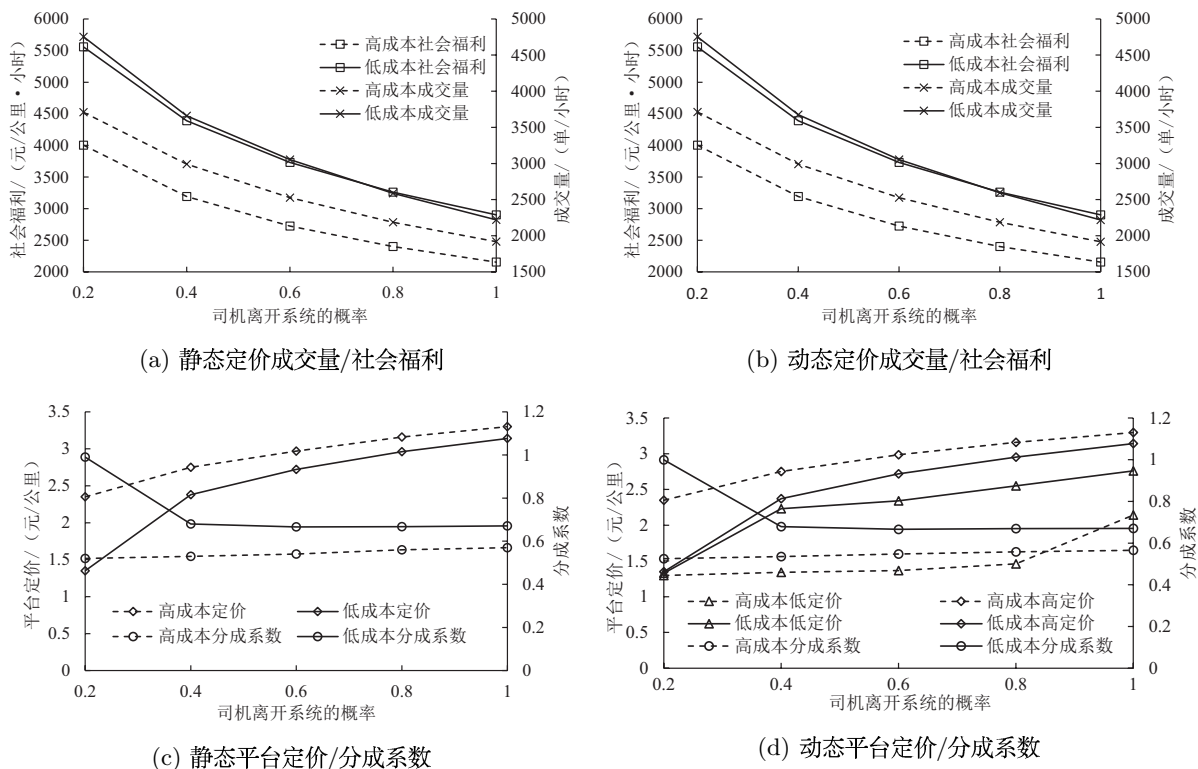


图 4 定价策略与司机离开系统的概率关系图

3.1.4 定价策略与乘客和司机心理预期价格分布的关系

乘客和司机的心理价格曲线分布决定着这两者是否加入网约车的运营与乘用,故有必要研究乘客和司机的心理预期价格分布对网约车定价的影响。图 5(a) 和 5(b) 分别为乘客/司机心理预期价格分布影响静态和动态定价成交量和社会福利的关系图。可以看到,在实行静态定价和动态定价策略下,随着司机和乘客心理

预期价格的提升, 平台成交量和社会福利逐渐上升, 这是由于在静态定价和动态定价模型中, 成交量和社会福利与乘客和司机的心理预期价格正相关; 其次, 动态定价策略与静态定价获得的最大社会福利及成交量相等, 同样验证了定理 3; 与此同时, 对比网约车司机的出行成本, 成本越高, 成交量和社会福利越小。

图 5(c) 和 5(d) 给出了乘客和司机的心理价格曲线分布对静态定价和动态定价平台定价和分成系数的影响。由图可知, 司机和乘客心理预期价格越高, 分成系数和平台定价越高。这是因为司机和乘客心理预期价格的增加引起司机供给量的减少和乘客需求量的增加从而导致平台定价的增加。所以, 为实现社会福利最大化, 其关键是要提高乘客和司机对平台定价的心理预期。这可以为司机和乘客分别投放网约车广告、加强平台舒适度和安全性, 从而提高乘客的乘坐意愿。

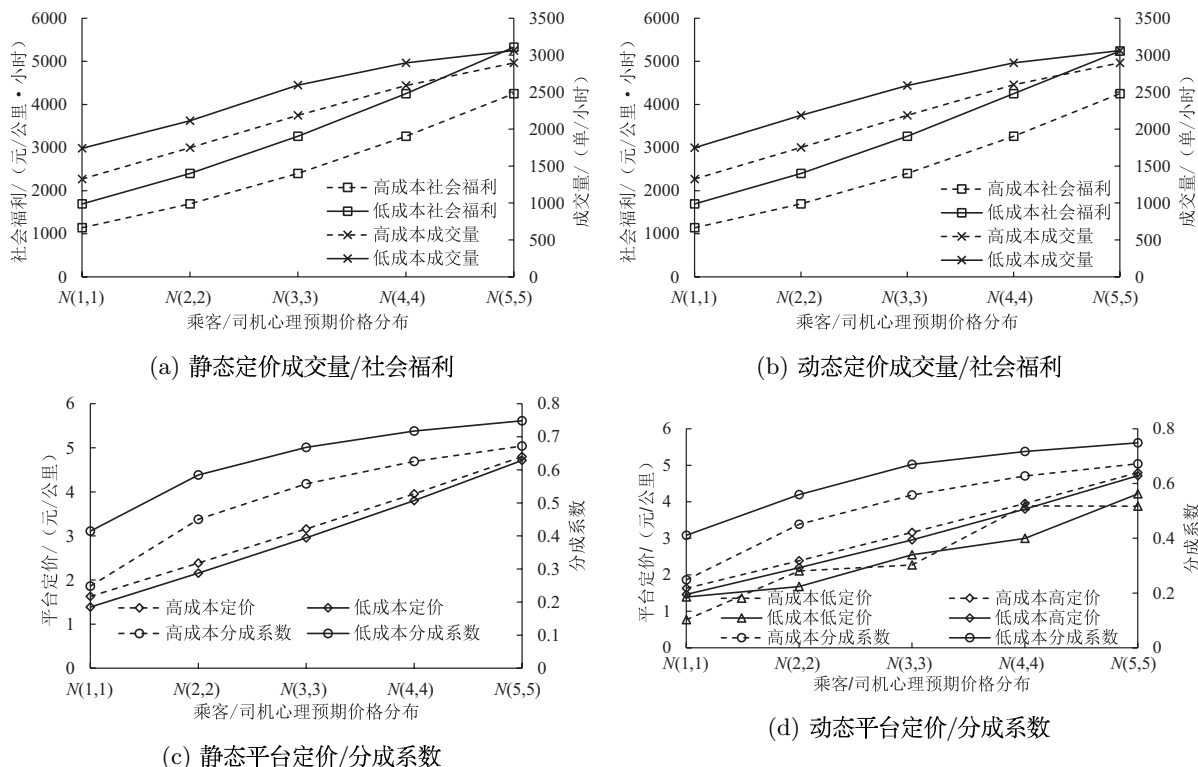


图 5 定价策略与乘客/司机心理预期价格分布关系图

3.1.5 定价策略与初始司机和乘客到达率的关系

网约车平台定价主要由司机供给和乘客需求两方共同决定, 故平台定价需要考虑平台中供给和需求。图 6(a) 和 6(b) 给出平台定价与初始司机/到达率影响静态定价和动态定价策略的成交量和社会福利的曲线。由图可知, 司机和乘客初始到达率的升高引起了平台的成交量和社会福利的增加。原因在于, 司机和乘客的初始到达率增加将提升司机供给和乘客需求。而需求和供给的增加一定会带来平台成交量和社会福利的增加; 其次, 动态定价与静态定价的最大社会福利及成交量仍然相等, 这验证了定理 3; 另一方面, 成交量和社会福利与网约车司机出行成本呈负相关关系: 成本越高, 成交量和社会福利越小。

图 6(c) 和 6(d) 代表静态和动态机制定价的平台网约车价格和分成系数。由图可知, 静态定价策略下获得的网约车价格、分成系数与动态定价策略结果相近。且随着平台中初始司机和乘客到达率不断增加, 平台定价和平台分成保持不变, 说明初始的司机供给和乘客需求 (供需比不变) 对最终的平台定价策略影响不大。

综上所述, 社会福利与平均乘坐时间, 司机离开系统的概率负相关, 与司机和乘客的心理预期价格及司机和乘客的初始到达率呈正相关关系。如果要想实现较高的社会福利, 需要较低的平均乘坐时间, 较低的司机离开系统的概率, 较高的司机和乘客的心理预期价格, 较高的司机和乘客到达率。更重要的是, 网约车司机的成本对社会福利有重要影响, 对未来网约车平台的发展具有参考意义。因此, 为了网约车市场总体的社会福利, 网约车平台需要增强平台便捷性、舒适度和安全性。与此同时, 政府应当加强网约车市场的监督和管理, 并且给予成本低的网约车品牌相应的政策扶持。

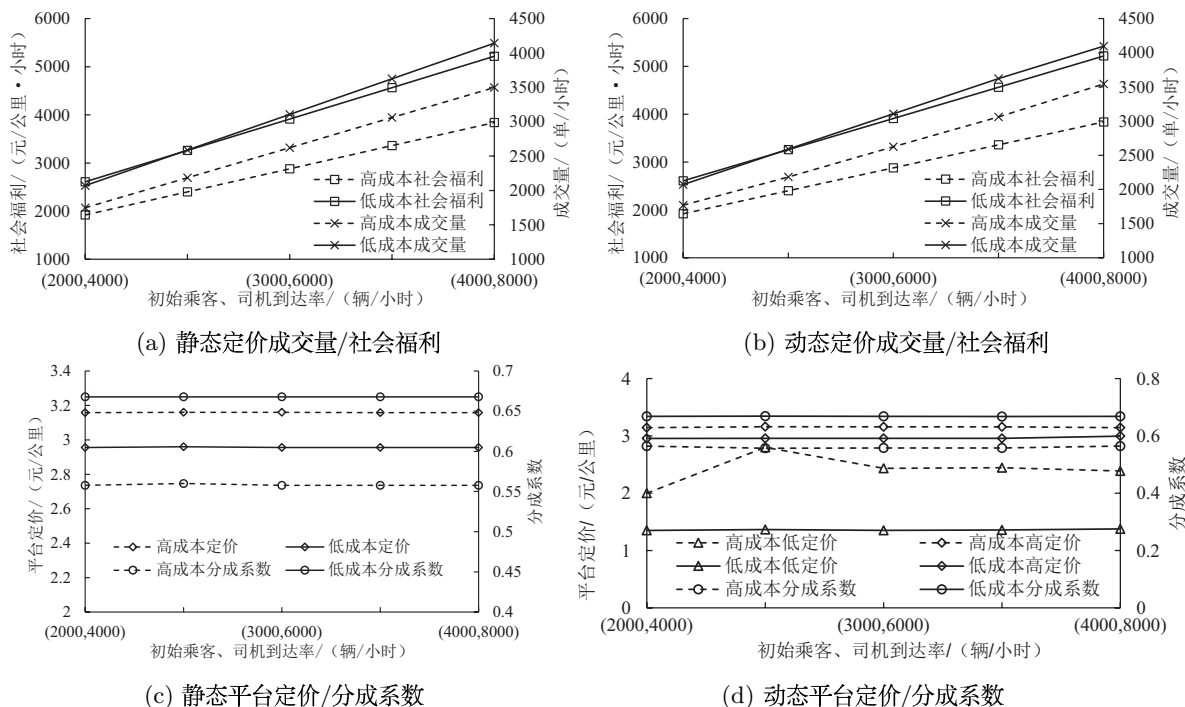


图 6 定价策略与初始司机/乘客到达率关系图

3.1.6 静态定价和动态定价策略下社会福利与定价策略的关系

为了考察社会福利与平台定价及分成系数三者间的内在关系, 本节利用数值模拟法揭示静态定价和动态定价的社会福利随着平台定价和分成系数的变化, 参数设置与 3.1.1 中设置相同 (为了简化参数的数量, 便于作图, 在动态定价策略中令 $p_h = p_l + 1$).

图 7 给出了静态定价下社会福利与定价策略的关系图. 由图可知: 在平台定价较低的情况下, 随着分成系数不断增加, 社会福利呈现先下降后上升的趋势; 在平台定价较高的情况下, 社会福利呈现先上升后下降的趋势; 在平台定价超过一定价格后, 社会福利呈现下降趋势. 这说明在低定价时, 社会福利主要受到司机供给的影响, 分成系数较小时, 司机的利润的增加速率小于平台利润的减少速率, 故先呈现下降趋势; 在较高定价时, 社会福利主要受到司机供给和乘客需求双方的影响, 初始分成系数的增加会引起司机利润的增加, 后期则会引起平台利润的下降; 当平台定价超过一定价格时, 分成系数越高, 司机的利润的增加速率小于平台利润的减少速率, 社会福利越小. 无论分成系数取值如何, 社会福利均随着平台定价的增加呈现先增后减的趋势. 这是由于在分成系数固定的情况下, 社会福利前期受到司机供给的影响, 呈上升趋势, 后期受到乘客需求的影响, 呈下降趋势. 综上所述: 当平台定价为 3.05 元/公里, 分成系数为 0.61 时, 成交量为 2186 单/小时, 社会福利达到最大, 为 2375.3 元/公里·小时.

图 8 为动态定价下的社会福利与定价策略的关系图. 由图可知: 在平台定价较低的情况下, 随着分成系数不断增加, 社会福利呈现先下降后上升的趋势; 在平台定价较高的情况下, 社会福利呈现先上升后下降的趋势; 在平台定价超过一定价格后, 社会福利呈现下降趋势. 动态定价策略下, 社会福利的变化趋势原因基本与静态定价策略相似. 分成系数为 0~0.2 及 0.8~1 时, 社会福利随着平台定价的增加呈现先增后减的趋势,

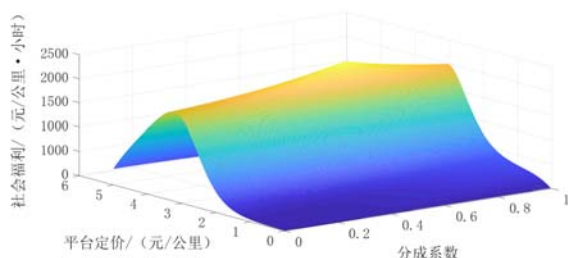


图 7 静态定价策略下社会福利与定价策略关系图

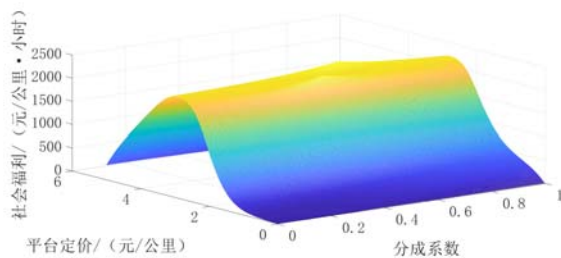


图 8 动态定价策略下社会福利与定价策略关系图

分成系数为 0.2~0.8 时, 社会福利随着平台定价的增加呈现先增后减再增再减的趋势, 中间部分社会福利的突降是由于此时的社会福利是根据 $p_l \leq p_{bal} \leq p_h$ 时的成交量决定的. 综上所述: 当平台低定价为 3.05 元/公里, 平台高定价为 4.05 元/公里, 分成系数为 0.61 时, 成交量为 2426 单/小时, 社会福利达到最大, 为 2378.2 元/公里·小时.

3.2 实例分析

本节利用表 1 给出的上海市黄浦区、苏州市姑苏区、南通市崇川区、扬州市广陵区的网约车需求, 考察在动态定价及静态定价条件下, 不同人口密度及出行时间等参数对最终平台定价的综合影响.

表 1 不同等级城市的基本参数设置

城市	上海	苏州	南通	扬州
人口密度/(万人/千米 ²)	3.39	1.11	0.4	0.15
初始司机到达率/(辆/小时)	1100	1500	1000	300
初始乘客到达率/(人/小时)	2200	3000	2000	600
司机离开系统的概率	0.8	0.8	0.8	0.8
平均乘坐时间/小时	0.75	0.5	0.5	0.33
乘客心理预期价格分布	$N(4, 1)$	$N(3, 1)$	$N(2, 1)$	$N(2, 1)$
司机心理预期价格分布	$N(4, 1)$	$N(4, 1)$	$N(2.5, 1)$	$N(3.5, 1)$

表 2 不同等级城市的模型结果

城市	上海		苏州		南通		扬州	
定价策略	静态	动态	静态	动态	静态	动态	静态	动态
分成系数	0.64	0.64	0.57	0.57	0.47	0.47	0.47	0.47
平台定价/(元/公里)	4.56	4.39	3.31	2.00	2.53	1.55	2.50	2.54
		4.56		3.30		2.55		3.11
成交量/(单/小时)	635	635	1129	1129	580	580	185	185
社会福利 (元/公里·小时)	686	686	1135	1135	517	517	145	145

从表 2 可知: 1) 不同人口密度的城市静态定价和动态定价所获得成交量和社会福利是相等的; 2) 人口密度越大的城市, 平台定价越高; 3) 不同等级的城市获得社会福利最大化的分成系数稳定在 0.5~0.7 左右, 与现实情况相符; 4) 动态定价的高定价和低定价始终围绕着静态定价上下波动. 因此, 针对实际情况, 政府和网约车平台应共同构建和谐良好的网约车市场, 通过增加网约车供给量及提升平台的适用性来扩大网约车的社会需求, 从而实现社会福利最大化.

4 结论

本文基于生灭模型研究了网约车平台上的司机和乘客供给和需求, 面向静态定价策略和动态定价策略, 构建了基于社会福利最大化的网约车平台定价及分成的优化模型, 并考察了网约车市场均衡的性质. 本文证明了网约车平台市场定价和分成系数均衡存在性; 证明了在市场规模有限情形的动态定价策略始终优于或等于静态定价策略. 本文基于数值算例验证上述结论, 并考察高低成本网约车实现社会福利最大化的定价策略适应性. 论文还基于实际的不同等级城市, 考察了静态定价和动态定价策略的具体应用, 研究发现: 1) 在静态定价和动态定价策略下, 社会福利与平均乘坐时间、司机离开系统的概率呈负相关关系, 与司机和乘客的心理预期价格及司机和乘客的初始到达率呈正相关关系; 2) 在静态定价和动态定价策略下, 社会福利总体上随着平台定价呈现先上升后下降的趋势, 社会福利在低定价时随着分成系数呈现先下降后上升的趋势, 较高定价时呈现先上升后下降的趋势, 高定价时呈现下降的趋势; 3) 人口密度越大的城市, 平台定价越高.

依托本文社会福利最大化网约车定价及分成模型, 可进一步从多个方面进行拓展, 例如: 1) 本研究考虑的是在大市场极限下的社会福利最大化模型, 未来可以针对不同平台数量进行针对性的分析; 2) 本研究考虑的是单阈值定价的策略, 缺乏对整个市场的灵活把控, 未来可以考虑多阈值定价的方式; 3) 本研究考虑的是司机排队的情况, 现实中的网约车有时候为双排队情况, 未来可以进一步细化模型; 4) 本文研究的是单一区域内的司机和乘客的流动, 未来可以考虑多个区域内的相互流动, 从而优化现有模型.

参考文献

[1] 吴丽萍. “互联网+”背景下专车用工模式劳动关系的认定[J]. 经济论坛, 2016(5): 148-151.
Wu L P. Determination of labor relationship in specialized vehicle employment mode under the background of “Internet+”[J]. Economy Forum, 2016(5): 148-151.

[2] House. 滴滴发布 2017 年数据: 平台 4.5 亿用户, 共完成 74.3 亿次出行服务[M/OL]. 中国, 2018 [2019-11-30].
<https://www.adquan.com/post-2-43126.html>.

[3] Fellows N T, Pitfield D E. An economic and operational evaluation of urban car-sharing[J]. Transportation Research Part D, 2000, 5(1): 1-10.

- [4] 常纓征. 对移动打车软件价格战的经济学思考 [J]. 价格理论与实践, 2014(4): 116–118.
Chang Y Z. Economic thinking on the price war of mobile taxi software[J]. Price Theory and Practice, 2014(4): 116–118.
- [5] Schwieterman J P, Bieszczat A. The cost to carshare: A review of the changing prices and taxation levels for carsharing in the United States 2011–2016[J]. Transport Policy, 2017, 57: 1–9.
- [6] Aloui C, Jebli K. Optimal pricing of a two-sided monopoly platform with a one-sided congestion effect[J]. International Review of Economics, 2010, 57(4): 423–439.
- [7] Bimpikis K, Candogan O, Saban D. Spatial pricing in ride-sharing networks[J]. Operations Research, 2018, 67(3): 744–769.
- [8] Azevedo E M, Weyl E G. Matching markets in the digital age[J]. Science, 2016, 352(6289): 1056–1057.
- [9] Chen M K. Dynamic pricing in a labor market: Surge pricing and flexible work on the Uber platform[C]// The 2016 ACM Conference, America, 2016.
- [10] Cohen P, Hahn R, Hall J. Using big data to estimate consumer surplus: The case of Uber[R]. NBER Working Papers, 2016.
- [11] Zha L, Yin Y, Du Y. Surge pricing and labor supply in the ride-sourcing market[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 23: 2–21.
- [12] Santos D O, Xavier E C. Dynamic taxi and ridesharing: A framework and heuristics for the optimization problem[C]// International Joint Conference on Artificial Intelligence, North America, 2013: 2885–2891.
- [13] Lin Y, Li W, Qiu F, et al. Research on optimization of vehicle routing problem for ride-sharing taxi[C]// International Conference on Traffic & Transportation Studies, China, 2012: 494–502.
- [14] Long J, Tan W, Szeto W Y, et al. Ride-sharing with travel time uncertainty[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 118: 143–171.
- [15] Hu L, Liu Y. Joint design of parking capacities and fleet size for one-way station-based carsharing systems with road congestion constraints[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 93: 268–299.
- [16] Angelopoulos A, Gavalas D, Konstantopoulos C, et al. Incentivized vehicle relocation in vehicle sharing systems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 97: 175–193.
- [17] Banerjee S, Freund D, Lykouris T. Pricing and optimization in shared vehicle systems: An approximation framework[C]// The 2017 ACM Conference, America, 2017.
- [18] 王汉斌, 岳帅. 网约车指导定价模型研究 [J]. 价格月刊, 2016(10): 32–36.
Wang H B, Yue S. Research on guidance pricing model of online appointment vehicle[J]. Prices Monthly, 2016(10): 32–36.
- [19] Wang X L, He F, Yang H, et al. Pricing strategies for a taxi-hailing platform[J]. Transportation Research Part E, 2016: 212–231.
- [20] Luo Q, Saigal R. Dynamic pricing for on-demand ride-sharing: A continuous approach[J]. SSRN Electronic Journal, 2017. doi: 10.2139/ssrn.3056498.
- [21] Banerjee S, Riquelme C, Johari R. Pricing in ride-share platforms: A queueing-theoretic approach[M/OL]. SSRN Electronic Journal, 2015[2019–11–30]. <http://ssrn.com/abstract=2568258>.
- [22] 赵道致, 杨洁. 考虑不同监管目标的网约车服务价格管制策略研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(10): 2523–2534.
Zhao D Z, Yang J. Research on the price regulation strategy of online car-hailing considering different regulation targets[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(10): 2523–2534.
- [23] He F, Shen Z J. Modeling taxi services with smartphone-based e-hailing applications[J]. Transportation Research Part C, 2015, 58: 93–106.
- [24] Chen L, Xu A, Zhu H. Computation of the geometric measure of entanglement for pure multiqubit states[J]. Physical Review A, 2010, 82(3): 9583–9588.
- [25] 孟立昕. “让出行更美好”——滴滴出行的商业模式分析 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
Meng L X. “Let the trip be better” — Analysis of the business model of Didi travel[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [26] 聂晓茜. 成本 - 收益与网约车运营监管 [J]. 时代金融, 2016, 23: 295–296.
Nie X Q. Cost-benefit and network car operation supervision[J]. Times Finance, 2016, 23: 295–296.
- [27] 杨耀坤, 张博, 沈万霞. 基于规模化电动车分时租赁动态成本效益建模仿真 [J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(1): 78–84.
Yang Y K, Zhang B, Shen W X. Modeling and simulation of dynamic cost-benefit based on time-sharing leasing of large-scale electric vehicles[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(1): 78–84.