

# The Pricing Model of Parking and Transit Fare Considering Park-and-Ride Facilities and User Heterogeneity

Luyi Yu, Xiaoning Zhang

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai  
Email: luyiyu13@163.com

Received: Oct. 16<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 4<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 11<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper extends the bottleneck model and develops a bi-level programming model to study the traffic charge problem between two companies, one of which operates buses and park-and-ride (P&R) parking lots simultaneously, while the other of which owns central parking lots. Therefore, commuters can get their destination by either auto or P&R mode. The proposed model analyzes two game scenarios: perfect competition and market regulation and considers heterogeneous users who are distinguished by their valuation of travel time. Specifically, in the upper level, the objective of operators is to maximize their own net profit; in the lower level, the followers would choose the optimal travel plans given the traffic charge rules. Finally, numerical examples are provided to illustrate the effectiveness of the developed models; furthermore, the result shows that when the proportion of commuters with higher value of time (VOT) is increasing, the gap of total social costs between two game scenarios becomes larger.

## Keywords

Park-and-Ride, User Heterogeneity, Traffic Charge, Bi-Level Programming, Bottleneck Model

---

# 考虑用户异质性和瓶颈处停车换乘的交通定价模型研究

于璐伊, 张小宁

同济大学, 经济与管理学院, 上海  
Email: luyiyu13@163.com

收稿日期: 2019年10月16日; 录用日期: 2019年11月4日; 发布日期: 2019年11月11日

## 摘要

本文基于停车换乘和全程自驾两种出行模式, 考虑两类出行时间价值和偏好不同的用户, 以瓶颈模型为基础搭建双层规划模型, 探究了停车场运营商和公交公司在市场竞争和政府干预两种情况下的交通定价方案。其中, 换乘停车场和中心停车场分别由公交公司和私人运营商所有。上层管理者的目标函数是最大化利益主体的净利润; 下层跟随者根据上层设定的交通价格, 选择最小化个人出行成本的交通出行方案。最后通过算例验证了模型的有效性, 并发现随着时间价值较高出行者对应出行比例的增大, 完全市场竞争和政府管控下的系统总成本之间的差距会逐步增大。

## 关键词

停车换乘, 用户异质性, 交通收费, 双层规划, 瓶颈模型

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着城镇化进程的不断加快, 城市私家车保有量快速增长, 越来越多的人选择私家车作为上班通勤的主要交通方式。但由于土地资源的限制, 很多大城市(特别是市中心)的停车位供给水平很难满足路网上的驾车出行需求, 尤其是早晚高峰的通勤时间, 停车难问题更加突出, 市中心停车场附近的交通拥堵问题进一步恶化[1]。为了缓解城市交通压力, 单方面提高交通供给水平(例如道路基础设施建设、停车场等)会催生出更多的市中心停车需求, 显然是不可持续的。学者们提出利用经济手段或其它创新型的交通管理方案, 在系统内部转化部分的机动车出行需求, 从而降低人们的出行成本[2] [3]。学术界认为提高公共交通的利用率不仅可以缓解交通拥堵和停车压力, 还能在很大程度上降低交通出行系统的碳排放量; 但实际上很多出行者离公共车站的距离较远, 相比于驾车出行并不十分方便, 因此学者们建议在公共站点附近提供停车换乘设施, 并基于此提出停车换乘(Parking and Ride, P&R)体系。它允许出行者从家驾车到附近的 P&R 停车场, 再从停车场换乘公共交通到达市中心的工作地; 政府为了吸引通勤者选择 P&R 出行一般会设定较低的停车价格[4] [5]。目前 P&R 已经在很多发达国家得到应用, 2015 年中国住建部也印发文件重点强调大力推进 P&R 停车设施建设, 做好停车规划与城市综合交通体系相关规划的衔接。上海作为国内城市发展的引领者, 截至 2017 年底, 已经建成 15 个 P&R 停车设施, 但运营效果整体呈现出冷热不均的现象, 一些换乘停车场的工作日泊位周转率超过 0.8 次/泊位, 接近超负荷运转; 而有些停车场则不足 0.2 次/泊位[6]。

为了提高停车换乘体系的运营效果, 不少学者对 P&R 模式进行了分析, 目前的研究主要集中于两方面: 一是从停车场设施供给角度提出最优 P&R 设计方案。Song 和 He 等人基于多个节点相连的路网结构上提出了一个具有互补约束的数学规划, 并利用有效集算法寻求停车场的选址、停车位供给水平及公共交通服务水平的最优解[7]; Aros-Vera 通过混合线性规划模型, 借助 Logit 模型刻画用户出行选择, 探究给定数量的 P&R 停车设施的选址问题, 实现停车位的最大利用率[8]; Holguin-Veras 等分别基于线性城市(通勤走廊)和二维城市结构, 应用抛物方程近似法, 研究了极大化潜在 P&R 需求下的 P&R 设施最优选

址问题[9]。二是在已有的 P&R 设施条件下, 从定价策略探究最优的交通管理方案, 这也是本文的主要研究内容。黄海军等人考虑全程驾车、地铁直达、停车换乘三种交通出行方式, 以瓶颈模型为基础, 建立了基于 Logit 随机均衡出行选择模型, 并通过优化地铁票价和停车收费水平, 分别实现社会净效益和地铁公司收益最大化[10]; Liu 和 Meng 通过连续离散的时间价值假定和基于概率论的随机用户均衡原则, 建立了引入拥挤收费的不动点模型, 结果证明综合应用拥挤收费与 P&R 体系是可以实现系统最优[11]; Gao 和 Sun 等在 P&R 体系中引入可交易的许可证制度借助 C-Logit 模型和双层规划模型, 研究了许可证价格对社会总成本的影响[12]。

尽管已经有不少关于 P&R 模式下的交通定价策略的研究, 但目前还存在以下三点缺陷: 首先过于简化公共交通的成本构造函数, 例如公共交通的服务频率、拥挤程度、停车场单位运营成本等经常被忽略; 其次一般假定用户具有相同的时间价值, 往往会忽略用户异质性对出行选择的影响; 同时大部分研究通常以最小化社会总成本作为模型优化目标, 但交通定价本身是一种经济行为, 有无政府干预可能驱使企业做出不同的定价决策, 基于不同的优化目标分析可能会得到更全面的结论。

本文研究了出行者具有不同出行偏好时, 停车场运营商和公交公司的交通定价问题。考虑自由市场和政府干预两种模式, 基于瓶颈模型建立了双层规划模型: 将出行者对出行方式、出行时间以及停车设施的选择作为下层规划, 画出用户出行均衡模式图; 将运营商对交通定价的决策作为上层规划。分析和对比双层规划在两种模式下的最优解, 为完善交通系统设计和收费政策提供理论基础。

## 2. 模型建立

### 2.1. 模型背景及参数说明

考虑有一条公路和公交线路并行的连接居民区 O 与工作地 D 的交通系统, 如图 1 所示。系统中有两种不同功能属性的停车场: 一是由停车场运营商(企业 P)在 D 处运营的市中心停车场(停车场 2), 单位运营成本较高; 二是由公交公司(企业 Q)为了推进公共交通的使用, 在瓶颈处运营的 P&R 停车场(停车场 1), 单位运营成本较低。

拥有小汽车的通勤者每天早晨从 O 出发到 D 上班, 共有两种交通出行方式选择: 一是全程自驾, 在工作地附近的停车场 2 处停车; 二是先自己开车到瓶颈处, 然后在瓶颈处的停车场 1 停车换乘公交到达工作地。两个停车场的停车位供给数量恰好能满足系统中的最大出行需求。本文重点研究这两种停车场的相互竞争, 为了简化研究, 则不考虑公交直达的出行方式。另外假定系统中的出行者是异质的, 不同出行者具有不同的出行价值和出行选择偏好。

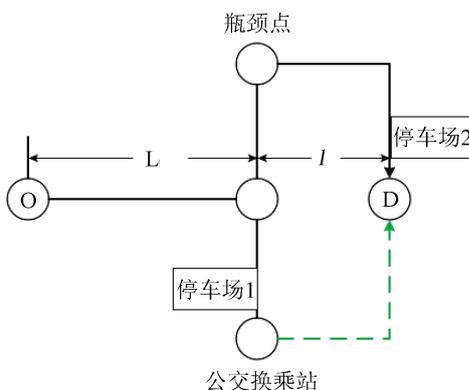


Figure 1. A one-to-one bi-modal transportation system

图 1. 单 OD 双模式出行的系统示意图

假定系统中存在两类出行者: 低收入人群(Group w)和高收入人群(Group b), 所有出行者都具有相同的期望到达时间  $t^*$ 。设  $\alpha_i$  表示第  $i$  类出行者的单位行驶时间成本;  $\theta_i$  是公交车内拥挤系数( $\theta_i > 0$ );  $\beta_i$  和  $\gamma_i$  分别表示提前到达和晚到的单位时间惩罚费用( $\beta_i < \alpha_i < \gamma_i$ ), 令  $\delta_i = \beta_i \gamma_i / (\beta_i + \gamma_i)$ 。参照 Cohen [13] 和 Arnott 等[14]的研究, 本文假定 Group w 具有相对较高的时间价值、比较灵活的工作时间和对公交拥挤较低的忍耐度; 同时相比于车厢内的单位拥挤成本, 通勤者往往对单位通行时间成本更敏感。整体上, 各参数间的关系如公式(1)所示:

$$\begin{aligned} \alpha_w > \alpha_b, \quad \beta_w < \beta_b, \quad \frac{\gamma_w}{\beta_w} = \frac{\gamma_b}{\beta_b} = \eta \\ \theta_w > \theta_b \\ \alpha_w / \theta_w > \alpha_b / \theta_b \end{aligned} \tag{1}$$

设系统中总的出行需求为  $N$ , Group w 和 Group b 的总人数分别为  $N_w$  和  $N_b$ 。设两类出行者中选择全程自驾的人数分别为  $N_w^A$  和  $N_b^A$ , 选择 P&R 出行的人数分别为  $N_w^T$  和  $N_b^T$ , 则存在  $N_w^A + N_b^A = N^A$ ,  $N_w^T + N_b^T = N^T$ ,  $N^A + N^T = N$ 。模型中涉及到的其它参数的补充说明如表 1 所示。

**Table 1.** List of other notations involved in the model

**表 1.** 模型中涉及到的其他参数说明

参数类别	参数符号	参数含义
停车场属性	$p_1, p_2$	停车场 1 和停车场 2 各自设定的停车费, 其中 $p_1 \leq p_2$
	$c_1, c_2$	停车场 1 和停车场 2 单个停车位的运营成本, 其中 $c_1 < p_1, c_2 < p_2, c_1 < c_2$
公交运营成本	$F$	公交运营的固定成本(如员工工资、保险费等)
	$a$	公交运营的变动成本(与业务量有关, 如每班车消耗的汽油、维修费用等), 用来反映公交车的服务频率
	$v_1, v_2$	小汽车和公交车的自由流行驶速度, 其中 $v_1 > v_2$
个人出行成本(包括小汽车出行和 P&R 出行)	$L$	从 O 到瓶颈处的距离
	$l$	从瓶颈处到 D 的距离
	$P(x)$	与乘坐距离 $x$ 有关的公交车票价
	$T$	停车换乘所需时间
	$s$	瓶颈处的通行能力

## 2.2. 上层交通定价优化目标

如第 1 章所述, 自由市场竞争模式下, 两家运营商的定价目标均为自最大化自身利益, 其中企业 P 收入来源仅为中心停车场的停车费, 企业 Q 的收入来源包括 P&R 停车场的停车费和公交车费。公式(2)和(3)分别表示了两家企业交通定价的优化目标:

$$\max TR_p = p_2 N^A - c_2 N \tag{2}$$

$$\max TR_Q = (p_1 + P(l) - a) N^T - c_1 N - F \tag{3}$$

政府干预模式下, 政府期望通过各项管制, 引导企业定价目标与最大化社会利益方向一致, 则优化目标变为公式(4), 其中  $MC_i^A$  和  $MC_i^T$  分别表示两类出行者中全程自驾和 P&R 的人均出行总成本。

$$\max TR = p_2 N^A + (p_1 + P(l)) N^T - a N^T - \sum_{i=w,b} [N_i^A (MC_i^A) + N_i^T (MC_i^T)] - (c_1 + c_2) N - F \tag{4}$$

## 2.3. 下层交通出行广义出行费用

### 2.3.1. 全程自驾出行费用

由于瓶颈处的通行能力有限, 全程自驾的出行者们不可能都在期望时间到达工作地。每一个出行者都需要在瓶颈处的排队延迟费用、早到或晚到的惩罚费用和在停车场 2 停车的费用之间做权衡, 选择最合适的出发时刻。总出行费用如式(5)所示:

$$C_i^A(t) = \alpha_i T(t) + \beta_i \max\{0, t^* - t - T(t)\} + \gamma_i \max\{0, t + T(t) - t^*\} + p_2, \quad i = w, b \quad (5)$$

式中:  $T(t)$  表示小汽车从家出发到停车场的总行驶时间, 包括自由流通行时间和瓶颈处的排队等待时间, 即  $T(t) = (L+l)/v_1 + D(t)/s$ ; 第二项和第三项分别表示  $t$  时刻到达瓶颈处的出行者对应的早到或晚到惩罚费用; 第四项是 D 处的停车费。

### 2.3.2. P&R 出行费用

出行者自驾到瓶颈处的停车场 2, 并通过换乘公交到达工作地, 出行成本包括四个部分: 从家出发到达 D 处花费的时间费用、公交车票价、车厢内拥挤成本和瓶颈处的停车费用。其表达式为:

$$C_i^T(l) = \alpha_i \left( \frac{L}{v_1} + \frac{l}{v_2} + T \right) + \theta_i N^T + P(l) + p_1, \quad i = w, b \quad (6)$$

其中出行者在路上耗费的交通时间包括以  $v_1$  的速度驾车从家出发行驶到瓶颈处的时间、停车换乘的时间  $T$  和以  $v_2$  的速度乘坐公交从瓶颈处到达 D 处的时间。

## 3. 用户出行均衡状态分析

### 3.1. 人均交通出行成本分析

假定系统中所有出行用户都不存在信息不对称的问题, 即都清楚掌握交通状态和停车场信息。当达到均衡状态时, 每一位出行者都不可能通过单方面改变其出行时刻或交通方式来减少自己的出行成本。

图 2 是全程驾车用户均衡出行分布模式。如图 2 所示, 考虑到单位延迟时间成本和行驶时间成本对出行成本的影响, Group b 会选择在早高峰的中间时间段出行, Group w 则更愿意选择在临近早高峰开始或结束的两个时间段出行。  $r_{1i}$  和  $r_{2i}$  分别表示第  $i$  类通勤者中早到者和晚到者的出发率, 即  $r_{1i} = \alpha_i s / (\alpha_i - \beta_i)$ ,  $r_{2i} = \alpha_i s / (\alpha_i + \gamma_i)$ 。

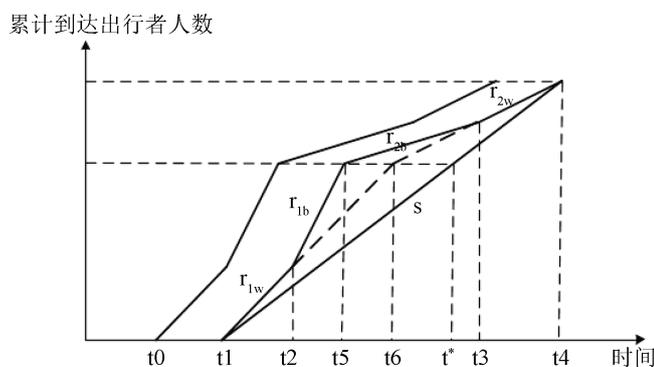


Figure 2. The auto commuting equilibrium traffic pattern

图 2. 全程驾车用户出行均衡分布

用户均衡状态下, 每类群体中各个出行者的出行成本相等。参照文献[15]中的研究, 以恰好到达工作

地的出行者的交通成本为例, Group w 和 Group b 的人均出行总成本可分别表示为:

$$MC_w^A = \frac{\delta_w N^A}{s} + \alpha_w \frac{L+l}{v_1} + p_2 \tag{7}$$

$$MC_b^A = \frac{\delta_b N_b^A}{s} + \frac{\alpha_b \delta_w N_w^A}{\alpha_w s} + \alpha_b \frac{L+l}{v_1} + p_2 \tag{8}$$

停车换乘的人均总成本可表示为式(9)和(10)。

$$MC_w^T = \alpha_w \left( \frac{L}{v_1} + \frac{l}{v_2} + T \right) + \theta_w N^T + P(l) + p_1 \tag{9}$$

$$MC_b^T = \alpha_b \left( \frac{L}{v_1} + \frac{l}{v_2} + T \right) + \theta_b N^T + P(l) + p_1 \tag{10}$$

### 3.2. 交通出行模式组合概览

用户的出行选择行为取决于出行方式、个人时间价值和缴纳的交通费用(包括停车费和公交费)。在用户均衡状态下, 整体上共存在 9 种可能的交通出行组合, 如表 2 所示。

**Table 2.** Nine possible traffic patterns  
**表 2.** 九种可能的交通出行组合

编号	交通出行状态	条件	交通出行方式分布
1	两类出行者都选择全程驾车	$MC_w^A < MC_w^T, MC_b^A < MC_b^T$	$N_w^A = N_w, N_b^A = N_b$ $N^T = 0, N^A = N$
2	两类出行者对全车驾车和 P&R 都有选择	$MC_w^A = MC_w^T, MC_b^A = MC_b^T$	$N_w^A + N_b^A = N^A$ $N_w^T + N_b^T = N^T$ $N_w^A, N_b^A, N_w^T, N_b^T > 0$
3	Group w 只选择全程驾车, Group b 对两种出行方式都有选择	$MC_w^A < MC_w^T, MC_b^A = MC_b^T$	$N_w^A = N_w, N_b^T = N^T$
4	Group w 只选择全程驾车, Group b 只选择 P&R	$MC_w^A < MC_w^T, MC_b^A > MC_b^T$	$N_w^A = N_w = N^A$ $N_b^T = N_b = N^T$
5	Group w 对两种出行方式都有选择, Group b 只选择 P&R	$MC_w^A = MC_w^T, MC_b^A > MC_b^T$	$N_w^A = N^A, N_b^T = N_b$
6	Group w 对两种出行方式都有选择, Group b 只选择全程驾车	$MC_w^A = MC_w^T, MC_b^A < MC_b^T$	$N_w^T = N^T, N_b^A = N_b$
7	Group w 只选择 P&R, Group b 对两种出行方式都有选择	$MC_w^A > MC_w^T, MC_b^A = MC_b^T$	$N_w^T = N_w, N_b^A = N^A$
8	Group w 只选择 P&R, Group b 只选择全程驾车	$MC_w^A > MC_w^T, MC_b^A < MC_b^T$	$N_b^A = N_b = N^A$ $N_w^T = N_w = N^T$
9	两类出行者都选择 P&R	$MC_w^A > MC_w^T, MC_b^A > MC_b^T$	$N_w^T = N_w, N_b^T = N_b$ $N^A = 0, N^T = N$

参照表 2 中参数的取值范围设定, 例如市中心停车场的停车费必然高于 P&R 停车场; 同时考虑企业为了保证自身净利润也会设置较为合理的交通收费价格, 来影响用户的出行选择。因此上述 9 种交通出行模式并不都是稳定的, 例如状态(1)、(4)、(8)和(9)。状态(2)总体上是一种相对稳定的组合, 政府也最期望在现实中实现状态(2), 即两类出行者对两种出行方式都有选择。因此在下面的模型讨论和算例分析中, 我们将重点对第二种出行均衡状态进行讨论。

根据交通出行组合(2)的定义, 我们得到均衡状态时的方式分担情况为:

$$N^A = \frac{\alpha_w s \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) + (P(l) + p_1 - p_2)s + \theta_w s N}{\delta_w + s\theta_w} \quad (11)$$

$$N^T = \frac{\delta_w N - \alpha_w s \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) - (P(l) + p_1 - p_2)s}{\delta_w + s\theta_w} \quad (12)$$

#### 4. 交通定价策略优化分析

基于上一章中状态(2)的出行模式, 这一章考虑自由竞争和政府管制两种模式, 分别对企业 P 和企业 Q 的交通收费策略进行优化求解。这里将定价问题看作是一个双层决策博弈, 上层管理者是领导者, 下层出行者是跟随者: 下层出行者根据上层设定的交通价格选择出行成本最小的交通出行方式。下层跟随者的目标函数是最小化个人出行成本, 上层领导者的目标函数是最大化利益主体的净利润。该问题的下层问题可以转化为两类出行者对两种交通方式均有选择的用户均衡, 下层问题的解可以转化为上层问题的约束, 从而将双层规划问题转化为带线性约束的单层数学规划问题[16]。

##### 4.1. 企业 P 和企业 Q 净利润最大(自由竞争模式)

企业 P 需要在停车场 2 设置合理的停车费以保证其自身利润最大化, 企业 Q 需要同时考虑公交车费和 P&R 停车费以实现自身利益最大化, 两家企业的目标函数分别如公式(13)和(14)所示。

$$\max TR_p = \frac{-(p_2)^2 s + p_2 \left[ \alpha_w s \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) + (P(l) + p_1)s + \theta_w s N \right]}{\delta_w + s\theta_w} - c_2 N \quad (13)$$

$$\max TR_Q = \frac{-(P(l) + p_1)^2 s + (P(l) + p_1) \left[ \delta_w N - \alpha_w s \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) + p_2 s + a s \right]}{\delta_w + s\theta_w} - \left[ a \frac{\delta_w N - \alpha_w s \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) + p_2 s}{\delta_w + s\theta_w} + c_1 N + F \right] \quad (14)$$

对式(13)求导得到停车场 2 的最优停车费定价如公式(15)所示, 也称为企业 P 对企业 Q 的价格的反应函数。同理, 对公式(14)关于  $P(l) + p_1$  求一阶导数, 得到企业 Q 对企业 P 的价格的反应函数, 如式(16)所示。

$$p_2 = \frac{P(l) + p_1 + \alpha_w \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) + \theta_w N}{2} \quad (15)$$

$$P(l) + p_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta_w N}{s} - \alpha_w \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) + p_2 + a \right] \quad (16)$$

在竞争经营模式下, 对于两家企业来说, 各自从自身利益最大化出发, 最稳妥的定价决策都是基于

对对方定价策略的反应, 即实现“纳什均衡”。联立方程(15)和(16), 得到纳什均衡点为:

$$p_2 = \frac{2\theta_w N}{3} + \frac{1}{3} \left( \frac{\delta_w N}{s} + a - \alpha_w \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) \right) \quad (17)$$

$$P(l) + p_1 = \frac{1}{3} \left[ \theta_w N - \alpha_w \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) \right] + \frac{2}{3} \left( \frac{\delta_w N}{s} + a \right) \quad (18)$$

#### 4.2. 社会净收益最大(政府干预模式)

此处将最大化系统净收益转化为最小化社会总成本, 则政府期望优化的目标函数如公式(19)所示:

$$\begin{aligned} \min TC = & N_w^A \left( \frac{\delta_w N^A}{s} + \alpha_w \frac{L+l}{v_1} \right) + N_b^A \left( \frac{\delta_b N_b^A}{s} + \frac{\alpha_b}{\alpha_w} \frac{\delta_w N_w^A}{s} + \alpha_b \frac{L+l}{v_1} \right) \\ & + N_w^T \left[ \alpha_w \left( \frac{L}{v_1} + \frac{l}{v_2} + T \right) + \theta_w N^T \right] + N_b^T \left[ \alpha_b \left( \frac{L}{v_1} + \frac{l}{v_2} + T \right) + \theta_b N^T \right] \\ & + aN^T + F + (c_1 + c_2)N \end{aligned} \quad (19)$$

式中第一项是全程驾车的出行总成本, 第二项是 P&R 的出行总成本, 第三项是公交和停车场运营的总成本。结合约束条件, 目标函数(19)可以转化为如下的式子:

$$\begin{aligned} \min TC = & (\alpha_w N_w + \alpha_b N_b) \left( \frac{L}{v_1} + \frac{l}{v_2} + T \right) + N^T (\theta_w N_w + \theta_b N_b) \\ & + (N - N^T) (P(l) + p_1 - p_2) + aN^T + F + (c_1 + c_2)N \end{aligned} \quad (20)$$

参照公式(12)可将式(20)转化为关于  $P(l) + p_1 - p_2$  的函数, 由此求得式(20)的一阶最优条件为:

$$P(l) + p_1 - p_2 = \frac{a - \left[ N_b (\theta_w - \theta_b) + \alpha_w \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) \right]}{2} \quad (21)$$

在此最优解下两种交通方式的流量分配结果为:

$$N^A = \frac{as + N_b s (\theta_w + \theta_b) + \alpha_w s \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) + 2\theta_w s N_w}{2(\delta_w + s\theta_w)} \quad (22)$$

$$N^T = \frac{2\delta_w N - \alpha_w s \left( \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} + T \right) - as + N_b s (\theta_w - \theta_b)}{\delta_w + s\theta_w} \quad (23)$$

由式(22)和(23)可知, 政府对交通收费价格的管控不会影响交通方式的流量分配结果, 只会影响社会总成本大小。

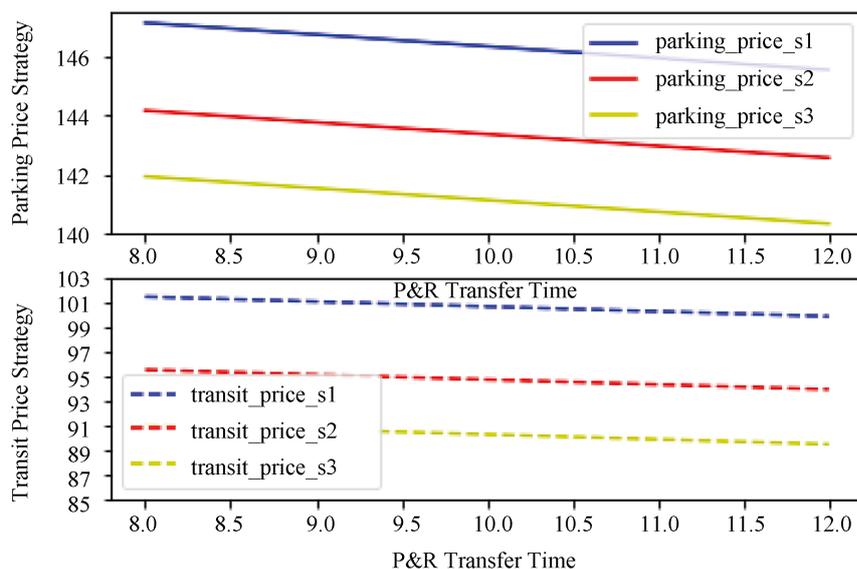
## 5. 算例分析

本章用一个算例验证前面的模型结果, 并对数据结果做进一步分析。首先通过变动停车换乘时间和瓶颈处的通行能力, 探究基础设施建设水平对系统成本和利润的影响; 其次通过调整两类出行者的分布比例探究企业竞争策略下的总成本与政府期望总成本之间的差异变化。模型输入参数如下: 系统中出行需求设为  $N = 10000$ , 两类出行者对应的权重系数(元/min)分别为  $(\alpha_w, \beta_w, \gamma_w, \theta_w) = (1.2, 0.5, 1.5, 0.02)$  和

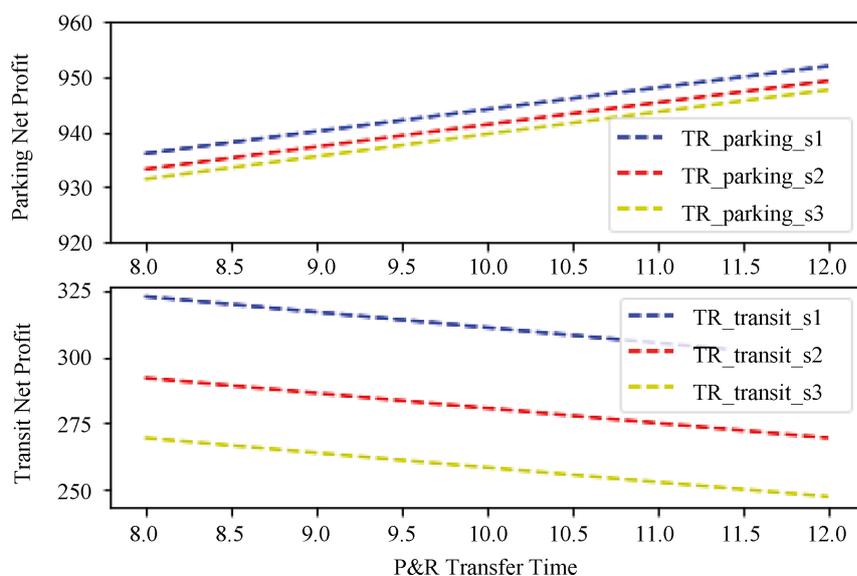
$(\alpha_b, \beta_b, \gamma_b, \theta_b) = (0.8, 0.6, 1.8, 0.01)$ 。路段参数为  $l = 10 \text{ km}$ ,  $L = 30 \text{ km}$ ,  $s = 70 \text{ 辆/min}$ ,  $T = 10 \text{ min}$ 。速度参数为  $v_1 = 0.5 \text{ km/min}$ ,  $v_2 = 0.33 \text{ km/min}$ 。停车场和公交公司运营参数为  $c_1 = 1 \text{ 元/停车位}$ ,  $c_2 = 5 \text{ 元/停车位}$ ,  $F = 0 \text{ 元}$ ,  $a = 0.5 \text{ 元/人}$ 。

### 5.1. 停车换乘时间和通行能力变化

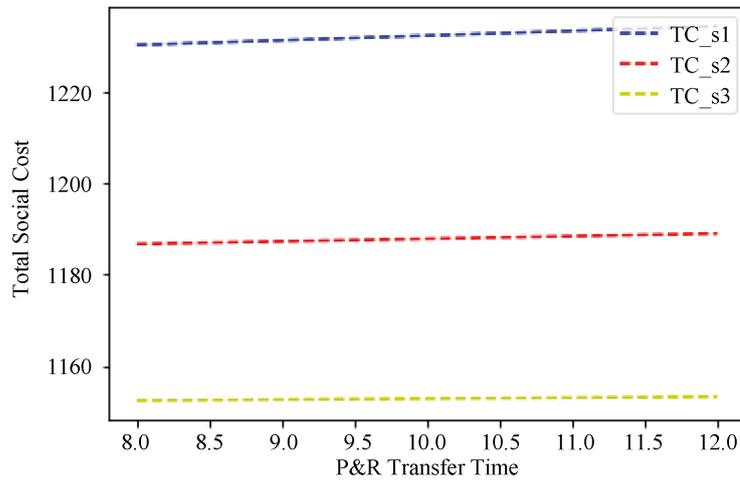
设两类出行者所占比例相等, 通行能力  $s$  由  $60 \text{ 辆/min}$  变化到  $80 \text{ 辆/min}$ , 停车换乘所需时间  $T$  由  $8$  分钟变化到  $12$  分钟。图 3~6 分别显示了不同通行能力  $s$  下, 停车换乘时间  $T$  变化对两家企业定价策略、各自净利润( $10^3$  元)、系统总成本( $10^3$  元)和 P&R 出行分担比例(%)的影响。



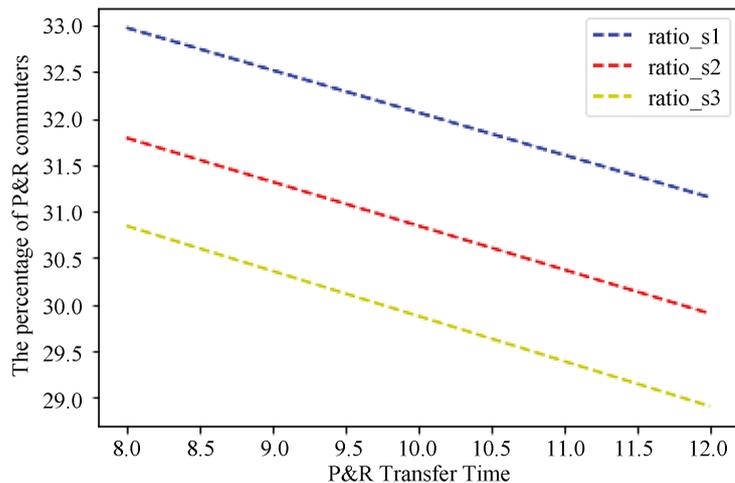
**Figure 3.** The prices of company p and company Q versus  $T$  with different  $s$   
**图 3.** 不同通行能力  $s$  下企业定价决策随停车换乘所需时间的变化



**Figure 4.** The net profit of company p and company Q versus  $T$  with different  $s$   
**图 4.** 不同通行能力  $s$  下企业净利润随停车换乘所需时间的变化



**Figure 5.** The total social cost versus  $T$  with different  $s$   
**图 5.** 不同通行能力  $s$  时社会总成本随停车换乘所需时间的变化



**Figure 6.** The percentage of P&R versus  $T$  with different  $s$   
**图 6.** 不同通行能力  $s$  时 P&R 出行分担比例随停车换乘所需时间的变化

由图 3 可以看出, 随着瓶颈路段通行能力的提高, 个人自驾出行成本降低, 因此停车场运营商和公交公司都通过降低收费价格使系统重新恢复均衡, 定价降幅分别为 2 元和 6 元左右。这是由于通行能力的提高降低了出行者全程驾车的个人出行成本, 这必然会吸引更多出行者选择全程自驾, 公交公司不得不选择大幅降低交通价格避免更多用户流失。另一方面, 停车换乘时间的增加对两家企业的价格决策影响大致相同, 定价降幅大约都为 1 元左右。结合图 4 的企业净利润变化情况进一步分析得到, 道路通行能力提高使得两家企业的利润都有所降低, 公交公司降低的幅度超过 25,000 元, 但停车场运营商损失较小; 停车换乘时间增加使得停车换乘成本提高, 诱使更多人选择全程驾车出行, 最终公交公司利润降低, 停车场运营商的利润反而有所增加。因此公交公司要重点加强 P&R 设施的建设, 该因素会显著影响出行者的出行成本和用户均衡状态。

图 5 的结果表明, 社会总成本对停车换乘时间的变化并不敏感, 仅有略微上浮。这可能是由于尽管停车换乘时间增加使得均衡状态下的个人出行成本提高, 但更多人选择全程自驾又使得公交运营的变动成本降低, 成本变动有所抵消。另外, 通行能力提高有助于社会总成本显著降低。这和均衡状态下的个

人出行成本以及公交运营的变动成本降低有关。

图 6 中 P&R 出行分担比例变化结果显示, 通行能力的提高和停车换乘时间的增加都会诱使更多出行者选择全程驾车方式出行, 这与实际情况相符。但有趣的是, 通行能力的变动对停车换乘出行分担比例的影响在逐渐削弱。事实上, 单方面提高通行能力的同时也带来了更多全程驾车出行需求, 这使得全程驾车出行成本的降幅有所减小。

## 5.2. 两类出行者所占比例对系统总成本的影响

这里设通行能力  $s = 70$  辆/min, 停车换乘时间  $T = 10$  min, Group w 所占比例由 0.4 变化到 0.7, 图 7 是自由竞争模式下和政府干预模式下的系统总成本随出行者比例的变化情况, 政府管制下的社会总成本一定是最低的。

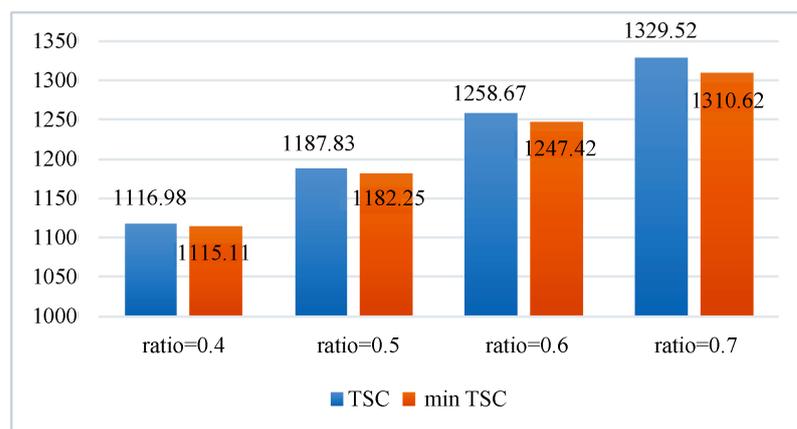


Figure 7. The total cost with or without government intervention versus different  $N^w$   
图 7. 竞争模式和政府干预模式下的社会总成本随出行者比例的变化

根据图 7 的结果, 可以发现企业竞争模式下, 为了追求各自利润最大化, 其定价决策往往使得系统总成本无法达到最优, 且这种成本差异会随着 Group w 在出行者中所占比例的增大而不断扩大。为了避免这种情况, 政府不能放任市场自由, 交管部门需要适时对交通价格进行管控, 例如设置合理的上限和下限或调整税率, 使系统总成本与政府期望的最低总成本差距不会过大。

## 6. 结语

本文主要分析了自由竞争模式和政府管制模式下两家企业的最优交通收费策略。借助瓶颈模型, 基于个人出行成本最小化分析出行者在全程驾车和停车换乘之间的出行决策。基于稳定性和合理性的考量, 在给出的不同用户均衡状态类型中选择两种出行方式均有涉及的状态作为重点进行定价策略优化研究。研究发现, 政府管控交通收费价格时, 其定价决策只会影响系统净收益, 对交通方式分担比例没有影响。通过算例分析进一步发现: 1) 瓶颈处通行能力提高和停车换乘时间增加会使得停车换乘流量分担比例和交通定价水平都有所降低, 但从企业整体运营绩效来看, 通行能力提高会降低公交公司和停车场运营商的净利润, 而停车换乘时间增加则只会降低公交公司利润, 停车场运营商利润反而有所增加。2) 社会总成本随着通行能力提高有显著降低, 受通行能力变动影响不大。3) 自由竞争模式下的社会总成本与政府管控模式下的最小总成本之间的差异随着 Group w 在出行者中所占比例的增大而增大, 政府可以通过设定交通收费价格上下限进行适时管控。

本文只对停车收费和公交票价进行了优化分析, 但并未考虑停车场容量对系统成本和企业盈利的影

响。其次, 随着人们环保意识的增强, 交通系统碳排放也应该加入出行成本的考虑。这些是我们未来的研究方向。

## 参考文献

- [1] Zhao, X.W., Chen, P., Jiao, J.F., *et al.* (2019) How Does “Park and Ride” Perform? An Evaluation Using Longitudinal Data. *Transport Policy*, **74**, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.004>
- [2] 李玉涛, 周江评. 重新定位停车政策: 优化出行的重要工具[J]. 城市规划, 2015(4): 71-75.
- [3] Qian, Z.S. and Rajagopal, R. (2014) Optimal Occupancy-Driven Parking Pricing under Demand Uncertainties and Traveler Heterogeneity: A Stochastic Control Approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, **67**, 144-165. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.03.002>
- [4] Liu, Z.Y., Chen, X.Y., Meng, Q. and Inhi, K. (2018) Remote Park-and-Ride Network Equilibrium Model and Its Applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, **117**, 37-62. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.08.004>
- [5] Mills, G. and White, P. (2018) Evaluating the Long-Term Impacts of Bus-Based Park and Ride. *Research in Transportation Economics*, **69**, 536-543. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.07.028>
- [6] 喻军皓. 上海市 P+R 停车场库发展策略研究[C]//中国城市规划设计研究院城市交通专业研究院. 创新驱动与智慧发展——2018 年中国城市交通规划年会论文集. 2018: 15.
- [7] Song, Z., He, Y. and Zhang, L. (2017) Integrated Planning of Park-and-Ride Facilities and Transit Service. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **74**, 182-195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.017>
- [8] Aros-Vera, F., Marianov, V. and Mitchell, J.E. (2013) P-Hub Approach for the Optimal Park-and-Ride Facility Location Problem. *European Journal of Operational Research*, **226**, 277-285. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.006>
- [9] Holguin-Veras, J., Yushimito, W.F., Aros-Vera, F., *et al.* (2012) User Rationality and Optimal Park-and-Ride Location under Potential Demand Maximization. *Transportation Research Part B: Methodological*, **46**, 949-970. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.02.011>
- [10] 田琼, 黄海军, 杨海. 瓶颈处停车换乘 logit 随机均衡选择模型[J]. 管理科学学报, 2005, 8(1): 1-6.
- [11] Liu, Z., Meng, Q., *et al.* (2014) Bus-Based Park-and-Ride System: A Stochastic Model on Multimodal Network with Congestion Pricing Schemes. *International Journal of Systems Science*, **45**, 994-1006. <https://doi.org/10.1080/00207721.2012.743617>
- [12] Gao, G., Sun, H., Wu, J., *et al.* (2018) Park-and-Ride Service Design under a Price-Based Tradable Credits Scheme in a Linear Monocentric City. *Transport Policy*, **68**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.04.001>
- [13] Cohen, Y. (1987) Commuter Welfare under Peak-Period Congestion Tolls: Who Gains and Who Loses. *International Journal of Transport Economics*, **14**, 239-266.
- [14] Arnott, R., Palma, A.D. and Lindsey, R. (1993) The Welfare Effects of Congestion Tolls with Heterogeneous Commuters. *Boston College Working Papers in Economics*, **28**, 139-161.
- [15] Liu, Y. and Nie, Y. (2011) Morning Commute Problem Considering Route Choice, User Heterogeneity and Alternative System Optima. *Transportation Research Part B Methodological*, **45**, 619-642. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.11.003>
- [16] 朱成娟. 考虑停车换乘的多方式交通网络出行行为分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.