第11卷第4期
2008年8月

管理科学学报
JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCES IN CHINA

Vol. 11 No. 4
Aug. 2008

政策博弈下的道路交通拥挤定价①

唐毓敏，冯苏苇
（上海财经大学公共经济与管理学院，上海 200433）

摘要：从经济学看，城市交通兼具内部性和外部性；对拥挤道路收取使用费，使外部性内部化，是优化交通的重要经济手段之一．基于博弈论和Arnott瓶颈模型，给出解析模型，探讨政府采用拥挤收费政策参与博弈的情形下，出行者行为以及道路总成本的改变．研究结果表明，作为外部性手段，设置恰当的收费费率，政府可以实现缓解交通拥挤和实现优化交通的管理目标．算例结果支持了模型分析的结论．

关键词：交通行为；博弈分析；纳什均衡；Arnott瓶颈模型

中图分类号：U491　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007－9807(2008)04－0076－07

0 引 言

为解决日益严重的城市交通问题，一些国家采用了道路拥挤收费政策[1]，政策的实践引发了广泛的争论，如何对收费政策绩效展开评价也逐渐成为学术界关注的焦点．

道路拥挤收费是政府通过制定收费政策来增加道路的使用成本，改变人们的出行行为，使交通流量在时空上重新分布，从而达到缓解交通拥堵的目标．这一概念始于经济学家Pigou[2]在1920年提出的拥挤税理论．20世纪60年代私人机动车在西方国家的普及，造成了严重的交通拥挤，也推动了拥挤税理论的扩展（Walters[3]、Smeed[4]、Vickrey[5]等）．近年来，在Arnott[6]等人对瓶颈模型进一步完善的基础上，Small[8]、Verhoef[9]、杨海[10]、黄海军[11]、Levinson[12]等学者在静态和动态收费的多个领域做出了引人注目的成绩．但至今，罕有研究涉及收费问题中的政府行为以及对收费政策的绩效评价．

作为政策的制定者和实施人，政府的作用在拥挤收费问题中是不容忽视的，关键是如何在一般的拥挤收费模型中，刻画出政府的行为以及描述政策制定对出行者的影响．博弈论正好为分析不同行为者为达到不同目的决策过程提供了框架．本文以博弈论为主要研究工具，在无政府参与的内部性博弈模型和有政府参与的外部性模型框架下，来研究拥挤收费政策对出行者行为的影响，并试图回答两个基本问题：1）在纳什均衡下，作为个人出行决策和政府收费政策的依据，个人成本和道路总成本是多少？2）拥挤收费政策下，人们的出行行为是怎样的？为了回答问题1），本文改进了Arnott瓶颈模型，计算了出行者成本和道路使用总成本．通过构造支付矩阵和确定出行概率，找出了政府调控目标、收费费率和出行概率之间的函数关系，从而为合理评价收费政策绩效提供了可行的定量分析方法．

1 拥挤定价政策博弈下的成本分析

城市交通具有内部性和外部性．在交通经济学中，内部性是指交通系统中交通资源的自行配置和优化过程；外部性是指由于交通系统内部优

① 收稿日期：2006－03－30；修订日期：2006－09－27．
基金项目：国家自然科学基金资助项目(70571048)．
作者简介：唐毓敏(1983—)，女，云南昆明人．Email：sweetcorntt@163.com

化过程给社会所带来的间接效应和影响. 首先介绍 Dusica 关于交通内部和外部博弈的一般数学描述[13]，然后在这个数学框架下，来研究影响出行决策的交通成本问题. 即在 Arnott 瓶颈模型中加入反映收费效应的相关项，计算出均衡状态下的个人出行成本和道路使用总成本，在博弈模型中，前者决定出行者是否出行，后者是政府制定收费政策和调整收费额度的判别依据.

1.1　交通系统内部性的博弈模型和成本分析

1.1.1　内部性博弈模型

首先考虑交通内部性. 内部性博弈的参与人为 N 个出行者，他们为满足各自不同的出行目的，选择各自理想的出行方式，并实现效用最大化. 通过博弈，出行者找到最理想的出行方式和获得最大的效用(或最小的出行成本). 假设:

1) 每个出行者都是理性的(他们的行为都是为了实现自己的最大效用)；

2) 每个出行者都知道其他出行者是理性的；

3) 每个出行者都具有同样的信息并且面临同样的出行环境；

4) 每个出行者都具有完全的知识.

设 S_i 是第 i 个出行者可选择的策略集，$i \in \{1,\cdots,N\}$. 根据 Dusica 的博弈模型[13]，出行者所采用的策略 $s_i \in S_i$，取决于政府实施的政策 θ，同时还取决于其他出行者出行策略 $s_{-i} \equiv (s_1,\cdots,s_{i-1},s_{i+1},\cdots,s_N)$. 以 $J_i[s_{-i}(\theta),s_i(\theta),\theta]$ 表示出行者 i 在政府策略 θ 下的效用，则有

$$U_{pi} = J_i[s_{-i}(\theta),s_i(\theta),\theta] = \bar{U} - c_{pi} \tag{1}$$

其中 $\bar{U}$ 是出行者 i 选择道路 p 时的期望效用，c_{pi} 是出行者 i 选择道路 p 时的出行成本. 根据效用最大化理论，出行者只有在期望效用大于出行成本时才会出行，反之不会有任何出行发生.

当其他出行者选择策略 S_{-i}^* 时，出行者 i 将会选择策略

$$s_i^*(\theta) = \arg\max_{s_i \in S_i} J_i(s_{-i}^*(\theta),s_i^*(\theta),\theta) \tag{2}$$

如果上式对所有的出行者 $i \in \{1,\cdots,N\}$ 都成立，即任何一个出行者都不可能单方面地通过改变策略来增加其效用时，$s^* \equiv (s_{-i}^*(\theta),s_i^*(\theta))$ 被称为在控制策略 θ 下的一个纳什均衡.

在这个模型中，当收益一定时，出行者是否出行，主要取决于他的出行成本. 下面利用 Arnott 瓶颈模型，来考察单条道路上出行者的个人成本和道路的总成本.

1.1.2　成本分析

按照 Arnott 瓶颈模型[6,7,14]，一定数量的出行者必须及时地从 A 赶到 B，而 A 到 B 间仅有一条路，设 AB 的最大通行量为 v，当大于 v 的出行者同时上路时，这条路上将出现一个交通瓶颈.

设出行者理想的到达时间为 t^*，最早的出行时间为 t_0，可准时到达的出发时间为 $\tilde{t}$ 和拥堵结束时间为 t_{max}. 记 α 为交通拥堵所造成的单位时间成本，β 为提前到达的单位时间成本，γ 为延迟到达的单位时间成本，且 $\gamma > \alpha > \beta$.

方便起见，假设没有拥堵时 A 到 B 的通行时间为 0，此时出发时间和到达时间重合，即 $t^* - \tilde{t} = 0$. 设 $T(t)$ 为拥堵时间，那么出行者提前和延迟到达的成本可记为

$$c = \begin{cases} \alpha T(t) + \beta(t^* - t - T(t)),\ t \in [t_0,\tilde{t}] \\ \alpha T(t) + \gamma(t - t^* + T(t)),\ t \in [\tilde{t},t_{max}] \end{cases} \tag{3}$$

并且

$$t^* - \tilde{t} = T(t) \tag{4}$$

出行者可以通过选择出行的时间来改变各自的出行成本. 当出行者不能再通过调整出行时间来降低他们的出行成本时，纳什均衡就实现了，这意味着在这个均衡中

$$\begin{aligned} \bar{c} &= \alpha T(t) + \beta(t^* - t - T(t)) \\ &= \alpha T(t) + \gamma(t - t^* + T(t)) \end{aligned} \tag{5}$$

并且可以计算出各种时间为(推导详见文献[6,7])

$$t_0 = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma}\frac{N}{v} \tag{6}$$

$$t_{max} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma}\frac{N}{v} \tag{7}$$

$$\tilde{t} = t^* - \frac{\beta}{\alpha}\frac{\gamma}{\beta + \gamma}\frac{N}{v} \tag{8}$$

特别地，对于 t_0 和 t_{max} 时刻的出行者，由于没有拥堵成本($T(t) = 0$)，只有时间表延时的花费，所以成本为

$$\bar{c} = \beta(t^* - t_0) = \gamma(t_{max} - t^*) \tag{9}$$

由于在这个均衡中每个人都有相同的成本，将式(6)代入式(9)，可以推得整个道路在没有任

何收费下的使用总成本为

$$TC = \bar{c}N = \frac{\beta\gamma}{\beta+\gamma}\frac{N^2}{v} \tag{10}$$

1.2 交通系统外部性的博弈模型和成本分析

1.2.1 外部性博弈模型

现在在交通内部性的基础上来讨论交通的外部性. 外部性博弈的参与人包括政府和 N 个出行者. 根据道路拥挤状况,政府采用某些政策(比如收费)来改变出行者的行为,以实现预定的调控目标;而出行者在政府的政策下,调整自己的出行行为并极大化各自的利益. 通过博弈,政府得到最优策略(如收费费率)和最大效用(或最小的社会成本);出行者选择最佳出行方式并获得最大的效用(或最小的出行成本).

政府在出行者选择策略 $s^*(\theta)$ 的基础上选择 $\theta \in \Theta$(其中 Θ 表示政府的策略集),并极大化其效用. 设政府的效用函数为 $R(s^*(\theta),\theta)$,这也是整个系统的效用和可实现的总收益. 这样政府行为可以描述为

$$\theta^* = \arg\max_{\theta\in\Theta} R(s^*(\theta),\theta) \tag{11}$$

如果式(2)和式(11)同时成立,并且无论哪一方都不能单方面地改变自己的策略来获得更大的效用时,政府和出行者之间的纳什均衡出现了.

1.2.2 成本分析

下面按照1.1.2的思路来讨论单条道路在政府实施收费政策后出行者和道路的成本.

设 η_e 和 η_l 分别为政府对提前和延后出行在单位时间内的收费(即费率),为鼓励人们提前出行以缓解交通压力,不妨设 $\eta_e < \eta_l$. 特别地,当 $\eta_e = 0$ 时,表示对提前出行者不收费. 在Arnott瓶颈模型中,出行者的成本变化为

$$c' = \begin{cases} \alpha T(t) + \beta(t^{*\prime} - t - T(t)) + \eta_e T(t), \\ \qquad t \in [t_0', \tilde{t}'] \\ \alpha T(t) + \gamma(t - t^{*\prime} + T(t)) + \eta_l T(t), \\ \qquad t \in [\tilde{t}', t_{\max}'] \end{cases} \tag{12}$$

设 $D(t)$ 表示在 t 时的排队长度,r 表示出行者从A出发时的离开率,那么可以得到

$$D(t) = \int_{t_0'}^{t} r(x)\,\mathrm{d}x - v(t - t_0') \tag{13}$$

$$T(t) = \frac{D(t)}{v} \tag{14}$$

同样地,出行者可以通过选择出发时间来改变出行成本. 当出行者不能通过调整出行时间来降低出行成本时,纳什均衡就实现了,这就意味着在这个均衡中

$$\begin{aligned} \overline{c'} &= \alpha T(t) + \beta(t^{*\prime} - t - T(t)) + \eta_e T(t) \\ &= \alpha T(t) + \gamma(t - t^{*\prime} + T(t)) + \eta_l T(t) \end{aligned} \tag{15}$$

将式(13)—式(15)对 t 求导,可以得到均衡状态下的离开率 r. 当 $\alpha > \beta$ 时,所有出行者的离开率(除了第一位和最后一位)都是阶段性恒定的. 设提前出发的离开率为 r_e 和延后出发的离开率为 r_l,则

$$r_e = \frac{(\alpha+\eta_e)v}{\alpha+\eta_e-\beta} = v + \frac{\beta v}{\alpha+\eta_e-\beta} \tag{16}$$

$$r_l = \frac{(\alpha+\eta_l)v}{\alpha+\eta_l+\gamma} = v - \frac{\gamma v}{\alpha+\eta_l+\gamma} \tag{17}$$

下面计算最早的出行时间 t_0' 和拥堵结束的时间 $t_{\max}'$ 和 $\tilde{t}'$. 由于收取使用费,出行者人数将会变为 N',那么

$$(\tilde{t}' - t_0')\frac{(\alpha+\eta_e)v}{\alpha+\eta_e-\beta} + (t_{\max}' - \tilde{t}')\frac{(\alpha+\eta_l)v}{\alpha+\eta_l+\gamma} = N' \tag{18}$$

从 t_0' 时刻所形成的拥堵最终在 $t_{\max}'$ 时刻结束,因此

$$(\tilde{t}' - t_0')(r_e - v) = (t_{\max}' - \tilde{t}')(v - r_l) \tag{19}$$

最后,由于在 $\tilde{t}'$ 时刻出发的出行者是可以准时到达的,则有

$$\tilde{t}' + \frac{r_e - v}{v}(\tilde{t}' - t_0') = t^{*\prime} \tag{20}$$

对上面的方程求解,可以得到

$$t_0' = t^{*\prime} - \frac{(\alpha+\eta_e)\gamma}{\beta(\alpha+\eta_l)+\gamma(\alpha+\eta_e)}\frac{N'}{v} \tag{21}$$

$$t_{\max}' = t^{*\prime} + \frac{(\alpha+\eta_l)\gamma}{\beta(\alpha+\eta_l)+\gamma(\alpha+\eta_e)}\frac{N'}{v} \tag{22}$$

$$\tilde{t}' = t^{*\prime} - \frac{\beta\gamma}{\beta(\alpha+\eta_l)+\gamma(\alpha+\eta_e)}\frac{N'}{v} \tag{23}$$

所以,在 t_0' 时刻个人的出行成本为

$$\bar{c}' = \beta(t^{*\prime} - t_0') = \gamma(t_{\max}' - t^{*\prime}) \tag{24}$$

将式(21)代入式(24),可以推出整个道路在政府收取使用费下的使用总成本为

$$TC' = \frac{(\alpha+\eta_e)\beta\gamma}{\beta(\alpha+\eta_l)+\gamma(\alpha+\eta_e)}\frac{N'^2}{v} \tag{25}$$

假设政府制定收费政策和调整收费额度的判

别依据是收取道路使用费后，道路使用总成本不增加，即

$$TC' \leqslant TC \tag{26}$$

当 $TC' = TC$ 时，由式(10)、(25) 和(26)，可以得到

$$N' = \sqrt{\frac{(\alpha + \eta_e)(\beta + \gamma)}{\beta(\alpha + \eta_1) + \gamma(\alpha + \eta_e)}}N \tag{27}$$

由于 η_e 和 η_1 是对提早和延后出行者收取的单位时间惩罚性费用，在政府鼓励人们提前出行的政策下，不妨假设对提前者不收取使用费，即 $\eta_e = 0$，这样式(27) 简化为

$$N' = \sqrt{\frac{\alpha(\beta + \gamma)}{\beta(\alpha + \eta_1) + \gamma\alpha}}N \tag{28}$$

由于 N' 是政府收费后预期的控制目标，可以作为已知的外生量，这样容易计算出对延后出行者收取的单位时间使用费为

$$\eta_1 = \frac{\alpha(\beta + \gamma)}{\beta}\left(\frac{N^2}{N'^2} - 1\right) \tag{29}$$

η_1 是费率，它是政府控制目标 N' 的函数. 对于单条收费道路，政府可以根据所想要达到的控制目标，选择适当的费率并收取使用费.

2　出行者在道路收费政策下的行为分析

在交通外部性博弈中，政府将根据政策目标，确定收费费率并制定相应的收费政策，那么在这个政策下，出行者的行为又将如何改变呢？

假设最大通行量为 v 的道路已经达到饱和，这时有两个出行者要选择出行. 每个出行者自由地选择自己的出行时间. 如果每个出行者都在相同的时间离开家出发，他们将同时加入路面的队伍中. 这时将会造成道路的拥堵，其中一个人可以在一个时间点到达，另一个人势必将被耽误，而在下一个时间点到达. 对于这些出行者来说，他们准时或是延迟的概率都是 50%. 出行者的策略不外乎有 3 种：提前出行(early)，准时出行(on time)和延后出行(late). 表 1 的支付矩阵表示了两位出行者在不同策略下的支付成本，其中 E,L 分别为提前和延后出行所支付的成本，D 为拥堵所造成的成本，且 $D > L > E$.

表 1　两出行者博弈的支付矩阵和纳什均衡

Table 1 Payoff matrix of two travelers and the Nash equilibrium

出行者		B		
		提前	按时	延后
A	提前	$0.5\times(E+D)$, $0.5\times(E+D)$	$\underline{E}$,$\underline{0}$	E,L
	按时	$\underline{0}$,$\underline{E}$	$0.5\times(L+D)$, $0.5\times(L+D)$	$\underline{0}$,L
	延后	L,E	L,$\underline{0}$	$0.5\times(L+D)$, $0.5\times(L+D)$

按照 Arnott 瓶颈模型，在纳什均衡下，对于出行者来说

$$E = \beta(t^* - t - T(t)) \tag{30}$$

$$D = \alpha T(t) \tag{31}$$

$$L = \gamma(t - t^* + T(t)) \tag{32}$$

通过划线法可以找到该博弈的两个纳什均衡[12] 分别为"提前，按时"和"按时，提前". 由于这个博弈有两个纳什均衡，出行者 A 和 B 对两个均衡的偏好显然有矛盾. 出行者 A 偏好后一个纳什均衡，而出行者 B 则偏好前一个纳什均衡. 因此当这两人从自身的最大利益(或最小支付) 出发独立做出决策时，不能确定他们究竟会做怎样的选择，也无法知道博弈的结果最终会是哪个纯策略组合. 也就是说，在纯策略的范围内，该博弈无法对两博弈方的选择提出确定性建议. 因此需要考虑博弈方采用混合策略的可能性，即计算两博弈方的出行概率.

现在设 p_{ea},p_{oa} 分别为出行者 A 选择提前和按时出行的概率，如果出行者 A 不想让出行者 B 利用自己的选择倾向占上风，则自己的概率选择应使出行者 B 选择两种策略的期望支付相同，即

$$0.5 \times (E + D) \times p_{ea} + E \times p_{oa} = 0 \times p_{ea} + 0.5 \times (L + D) \times p_{oa} \tag{33}$$

由于 $p_{ea} + p_{oa} = 1$，因此

$$p_{ea} = \frac{D - 2E + L}{2D - E + L}$$

$$p_{oa} = \frac{D + E}{2D - E + L}$$

同样,设 p_{eb},p_{ob} 分别为出行者 B 选择提前和按时出行的概率,可以得到 $p_{eb} = p_{ea}$,$p_{ob} = p_{oa}$.

当出行者 A 以 p_{ea},p_{oa} 的概率,出行者 B 以 p_{eb},p_{ob} 的概率随机选择出行方式时,双方都无法通过单独改变策略而提高出行收益或是降低出行成本,因此双方上述概率分布的组合构成一个混合策略纳什均衡.

由于在这个博弈中,博弈双方都是无差别的,不妨设

$$p_e = p_{ea} = p_{eb} = \frac{D - 2E + L}{2D - E + L} \tag{34}$$

将式(30)—(32) 代入式(34),可以得到

$$\begin{aligned} p_e &= \frac{D - 2E + L}{2D - E + L} \\ &= \frac{\alpha T(t) - 2\beta(t^* - t - T(t)) + \gamma(t - t^* + T(t))}{2\alpha T(t) - \beta(t^* - t - T(t)) + \gamma(t - t^* + T(t))} \\ &= \frac{(\gamma + \alpha + 2\beta) T(t) + (\gamma + 2\beta)(t - t^*)}{(\gamma + 2\alpha + \beta) T(t) + (\gamma + \beta)(t - t^*)} \end{aligned} \tag{35}$$

假设出行者根据出行经验选择可准时到达的出发时间为 $\tilde{t}$,利用式(4),则出行者的出行概率为

$$p_e = \frac{1}{2} \tag{36}$$

当政府开始实施收费政策 η_1 后,出行者调整自己的出行行为,类似的推导可以求出变化后的出行概率为

$$p'_e = \frac{\eta_1 + 1}{\eta_1 + 2} \tag{37}$$

出行者提前出行的概率增大,从而缓解了交通高峰时段路面的压力.

3 算 例

通过以下数据来演示这个模型.

假设一人一车,从 A、B 两地间的道路 AB,每高峰小时的最大通行量 $v = 2\,500$ 辆,出行者的单位时间成本分别为 $\alpha = 10$ 元,$\beta = 7$ 元,$\gamma = 15$ 元,在高峰时段道路 AB 的通行总人数 $N = 4\,000$. 现政府欲减轻该条道路高峰时段的交通压力,于是对该条道路实行收费政策. 按照模型,由外生的政策目标 N',分别根据式(29)、式(37) 和式(25),计算出收费费率 η_1、提前出行概率 p_e 和道路使用总成本 TC.

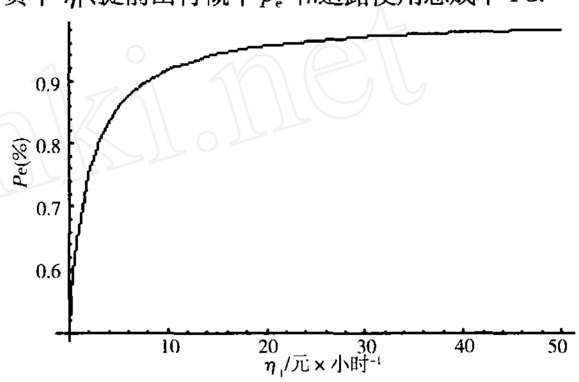

图 1 提前出行概率与费率的关系曲线

Fig. 1 Probability of early-arrived traveler changes with

表 2 政府调控目标、收费费率、提前出行概率与道路使用总成本的关系

Table 2 Ratio of charging, probability of early-arrived traveler and the total travel cost vary with regulation target

政策目标 N'/辆×小时$^{-1}$	费率 η_1/元×小时$^{-1}$	出行者提前出行概率 p_e(%)	道路使用总成本 TC/元
4 000	0.00	50.00	64 000.00
3 900	3.12	72.47	57 836.03
3 800	6.48	81.47	52 128.40
3 700	10.12	86.31	46 854.03
3 600	14.07	89.33	41 990.40
3 500	18.37	91.39	37 515.63
3 400	23.04	92.89	33 408.40
3 300	28.15	94.03	29 648.03
3 200	33.75	94.92	26 214.40
3 100	39.90	95.63	23 088.03

表2为政策目标与调控效果的关系.可以清楚地看到，随着政府控制目标和收费费率的调整，出行者的出行方式有明显的改变.在道路AB的通行总人数N向政策目标N'趋近的过程中，单位时间的收费逐渐增加，道路使用总成本逐渐减少.不收费时约50%的人选择提前出行，收费后，提前出行的人达到72.47%，当费率增加到14.07时，近9成(89.33%)的人选择提前出行以规避收费.从式(37)的函数变化率来看，提前出行概率对费率的边际函数在费率为零时有最大值0.25，然后随费率增加而减少并趋近于零.这表明如果以提前出行概率为调控拥挤的政策效果测度，收费政策在初始推行阶段有最佳的政策效果，之后随费率增加政策效应逐渐衰减.

4 结 论

本文通过构造一个解析模型，研究了政府实施拥挤道路使用收费政策对出行者行为的影响.首先以博弈论为工具，研究了城市交通内部性均衡以及拥挤定价策略下的外部性均衡.进而利用改进的Arnott瓶颈模型，计算了单条道路在纳什均衡下，内部性模型和外部性模型的个人和道路总出行成本.在出行者选择提前或按时出行策略的期望支付相同假设下，构造了提前、按时和延后出行的概率与出行成本的关系式.在这个模型框架下，找出了政府调控目标、收费费率、出行概率和道路总成本之间的定量计算方法.最后以一个简单的算例，说明了如何利用这个解析模型，来研究收费政策对出行者行为的影响.

本文是从效用(或成本)的角度来构造模型的.应该看到，造成交通拥挤的原因是多方面的，价格(或成本)只是其中的一个影响因素.作为调控拥堵的经济手段之一，在高峰时段收取拥挤费，可以有效改变收费道路出行者的行为，在合理“削峰”(消除主干道拥挤)以及充分利用路网资源上，有着积极意义.但是拥挤收费的效果也可能引起拥挤路段的转移.相关政策的制定应围绕如何使出行者减少出行，并鼓励人们采用减弱拥挤外效应的方式.

本文仅是从理论上探讨了政府的收费策略对单条道路的影响，并没有考虑收费的具体实施办法(如改进的Arnott瓶颈模型中时变的收费如何征收)，也没有考虑交通网络的情形.模型中假设道路总保持最佳的运行状态，即以最大通行量服务，实际上交通密度和流量之间存在着约束关系，使得道路运行状态对出行成本存在一定的影响.这些都是将要开展的研究内容.

参 考 文 献:

[1] 黄海军. 拥挤道路使用收费的研究进展和实践难题[J]. 中国科学基金, 2003, (4): 198—202.
Huang Hai-jun. Research and practice progresses of congested road-use pricing[J]. Bulletin of National Science Foundation of China, 2003, (4): 198—202. (in Chinese)

[2] Pigou A C. The Economics of Welfare[M]. London: MacMillan, 1920.

[3] Walters A A. The theory of measurement of private and social costs of highway congestion[J]. Econometrics, 1961, 29(10): 676—699.

[4] Smeed R. Traffic studies and urban congestion[J]. Journal of Transport Economics and Policy, 1968, 2(1): 33—70.

[5] Vickrey W. Pricing in urban and suburban transport[J]. American Economic Review, 1963, 53(5): 452—465.

[6] Arnott R, De Palma A, Lindsey R. Economics of a bottleneck[J]. Journal of Urban Economics, 1990, 27(1): 111—130.

[7] Arnott R, De Palma A, Lindsey R. Recent Developments in the Bottleneck Model[R]. Research Paper No. 95-11, Dept of Economics, Boston, 1996.

[8] Small K A. The incidence of congestion tolls on urban highways[J]. Journal of Urban Economics, 1983, 13(1): 90—111.

[9] Verhoef E, Nijkamp P, Rietveld P. Second-best regulation of road transportation externalities[J]. Journal of Transportation Economics and Policies, 1995, 29(2): 147—167.

[10] Yang H, Huang H J. Pricing of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network? [J] Transportation Research A, 1998, 32(1): 45—54.

[11] Huang H J. Fares and tolls in a competitive system with transit and highway: The case with two groups of commuters[J]. Transportation Research E, 2000, 36(4): 267—284.

[12] Levinson D. Microfoundations of Congestion and Pricing. In: International Symposium on the Theory and Practice of Congestion Charging[C]. London, 2003.

[13] Joksimovic D, Bliemer M C, Bovy P H. Different Policy Objectives of the Road Pricing Problem with Elastic Demand - a Game Theory Approach. In: 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board[C]. Washington, 2005.

[14] Schneider K, Weimann J. Against All Odds: Nash Equilibria in a Road Pricing Experiment[R]. Research Paper, Faculty of Economics and Management, University of Magdeburg, Germany, 2002.

[15] 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—5.
Tian Qiong, Huang Haijun, Yang Hai. Mode choice models based on logit stochastic equilibrium in transportation (systems) with park-and-ride option[J]. Journal of Management Sciences in China, 2005, 8(1): 1—5. (in Chinese)

Model of traffic behavior based on game theory under road-pricing regulation of government

TANG Yu-min, *FENG Su-wei*

School of Public Economy & Administration, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China

Abstract: In the view of economics, traffic system has the feature of both internality and externality and the internalization of its externality by traffic management strategies results in the optimization of traffic system. Based on Game Theory and the Arnott's bottleneck model, this paper presents a theoretical model of traffic behavior under road-pricing regulation manipulated by the government. First, two Nash equilibrium models are introduced to describe internality and externality of traffic system respectively. After the private and total travel cost are calculated using an improved Arnott's bottleneck model, the corresponding payoff matrix and the early-arrived and on-time-arrived probabilities are also decided to reveal the relationships among the regulation target, the ratio of charging, travel probabilities and total cost on the road. A numerical example is set up to demonstrate the results of the model.

Key words: traffic behavior; game theory; Nash equilibrium; Arnott's bottleneck model