

# 交通拥挤收费的社会公平性分析

张小宁, 曹 津

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 建立交通模型, 分析拥挤收费对社会各阶层的公平性影响. 出行者的时间价值(VOT)服从连续型分布. 在一个简单的路网上, 建立交通均衡模型, 分析出行者根据自己的VOT选择出行方式和行驶路径的行为. 分析了拥挤收费对不同VOT居民的出行方式、路径选择和费用变化影响, 发现实施拥挤收费后大多数出行者的行程时间和总体出行费用都呈现下降趋势. 具体而言, 广大VOT较低的公交乘客和VOT较高的驾车族从拥挤收费中获益, 少量VOT较低的驾车族因拥挤收费受损.

**关键词:** 拥挤收费; 公平性; 时间价值; 交通需求

**中图分类号:** U 491.123

**文献标识码:** A

## Analysis of Social Equity in Congestion Pricing

ZHANG Xiaoning, CAO Jin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In both theoretical and practical studies, models are constructed to analyze the inequity impact to different travelers from congestion pricing. It is assumed that value of time of travelers follows continuous distribution. In an example network, the equilibrium behavior of travelers in choosing travel mode and route is established. Then the variation of travel mode, travel route and travel cost after congestion pricing is investigated, and it is found that travel time and travel cost decrease after congestion pricing for the majority of travelers. Specifically, most bus passengers and drivers with high VOT benefit from congestion pricing, but few drivers with lower VOT suffer from congestion pricing.

**Key words:** congestion pricing; equity; value of time; traffic demand

道路收费对不同收入水平的用户具有不同的影响是拥挤收费最普遍的争议. 使用收费道路的人们

被强制收费,但同时可以享受到较低的出行时间:因为收费降低了交通流量,也降低了出行时间. 具有较高时间价值(value of time, VOT)的出行者会得到更好的效益,因为交通拥挤程度的减轻使他们的受益远远高于额外收费引起的损失. 而具有较低时间价值的开车族虽然能享受交通拥挤缓解后的出行便利,但出行时间减少带来的便利或许不能弥补经济支出的增加. 时间价值更低的出行者可能放弃驾车,改乘公共交通. 这种穷人和富人之间的社会不公平性持续得到了关注<sup>[1-7]</sup>. 在国内,浙江大学刘南等<sup>[8]</sup>研究了道路收费对不同收入水平的驾驶员的差异性影响. 虽然国内外已经有一些关于交通收费公平性的研究成果,但他们均只考虑拥挤收费前后私人车辆拥有者出行费用的变化;而对收费前后私家车和公交出行之间的转移关系,以及拥挤收费后公交乘客的出行费用变化情况缺乏研究.

本文主要针对出行者的公平性进行研究,在公交和私人小汽车并存的交通网络上分析拥挤收费对于不同收入水平的出行者所产生的不同影响,其中收入水平高低由时间价值高低反映出. 在收费前后,出行者因为自身经济等条件而调节出行方式,从而导致不同出行方式的用户占有率、行程时间和广义交通费用发生变化. 这几项变化既是出行者普遍关注的,也是政府确定政策的重要依据. 本文通过模型的假设和计算过程得到其变化趋势,并深入分析了出行者在收费后重新选择其出行方式时所受到的不同影响.

## 1 模型假设

如图1所示的道路网络包含2个节点和2条路径. 路径1距离较短,在自由流时行程时间较小,但通行能力 $C_1$ 较小,即随着交通量增加拥挤迅速上

收稿日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70871092, 50878156); 上海市科技启明星计划资助项目(09QA1406200)

作者简介: 张小宁(1975—),男,研究员,工学博士,主要研究方向为交通运输. E-mail: cexzhang@tongji.edu.cn

升. 路径 2 距离较长, 在自由流时行程时间较大, 但通行能力  $C_2$  较大, 即随着交通量增加拥挤增加较慢. 路径 1 代表城市中心道路, 路径 2 代表环城市周边道路. 由 A 到 B 出行也可以选择公共汽车. 本文假定公共汽车只沿路径 1 行驶.

可见, 出行者可选择以下 3 种方式出行: ①  $p = 1$ , 驾驶小汽车沿路径 1 出行; ②  $p = 2$ , 驾驶小汽车沿路径 2 出行; ③  $p = 3$ , 乘坐公共汽车沿路径 1 出行. 符号  $v_p$ ,  $t_p$  和  $F_p$  分别表示出行方式  $p$  的流量、行驶时间和出行费用.

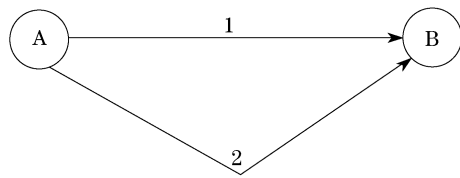


图 1 模型网络

Fig. 1 A network with two paths

行程时间计算采用美国联邦公路局的计算公式

$$t_a(v_a) = t_{0,a} \left[ 1.0 + 0.15 \left( \frac{v_a}{C_a} \right)^4 \right] \quad (1)$$

式中:  $t_a(v_a)$  为路段  $a$  上车辆的行程时间;  $t_{0,a}$  为路段  $a$  的自由流行程时间;  $v_a$  为路段  $a$  的流量;  $C_a$  为路段  $a$  的通行能力.

公交车流量转换为当量小汽车的换算系数为 2, 即每个公交车造成的拥挤相当于 2 辆小汽车. 另外, 公共汽车由于靠站、上下客等原因, 行程时间比小汽车要长. 本文假定在路径 1 上, 公交车的行程时间比小汽车长  $w$ . 因此, 3 种出行选项的行程时间分别为

$$t_1(v_1, r) = t_{0,1} \left[ 1.0 + 0.15 \left( \frac{2r + v_1}{C_1} \right)^4 \right] \quad (2)$$

$$t_2(v_2) = t_{0,2} \left[ 1.0 + 0.15 \left( \frac{v_2}{C_2} \right)^4 \right] \quad (3)$$

$$t_3(v_1, r) = t_{0,1} \left[ 1.0 + 0.15 \left( \frac{2r + v_1}{C_1} \right)^4 \right] + w \quad (4)$$

式中:  $t_1, t_2, t_3$  分别为驾车沿近路、远路和乘坐公交车这 3 种出行方式的行程时间;  $v_1, v_2$  分别为近路、远路上的小汽车流量;  $r$  为近路上的公交车流量;  $C_1, C_2$  分别为近路和远路的通行能力.

居民的出行费用包含出行时间费用和货币费用. 对于驾车者来说, 货币费用包括汽油费、车损费、收费道路上的过路费等. 对于公交车乘客来说, 货币费用为车票. 为了统一计算单位, 本文把出行时间乘以单位时间价值转换为货币费用. 这样, 对于驾车走路径 1、路径 2 和乘公交车走路径 1 这 3 种出行方

式, 以货币为单位的总交通费用分别由下式给出:

$$G_1(\tau) = F_1 + \tau t_1 + k \quad (5)$$

$$G_2(\tau) = F_2 + \tau t_2 \quad (6)$$

$$G_3(\tau) = F_3 + \tau t_3 \quad (7)$$

式中:  $\tau$  为出行者的 VOT, 即出行者把单位出行时间换算成等量的货币费用额度(一般而言, 收入高的居民对应的 VOT 值较高, 而收入低的居民对应的 VOT 值较低. 在中国, 公务车辆对收费不敏感, 所以相应的 VOT 也很高);  $F_1, F_2, F_3$  分别为 3 种出行方式的货币费用;  $k$  为拥挤收费;  $t_1, t_2, t_3$  分别为 3 种出行方式的行程时间.

## 2 出行者时间价值的差异性和交通方式选择

居民的时间价值服从对数正态分布(图 2). 图中, 横坐标  $\tau$  代表 VOT, 纵坐标  $f$  为具有该  $\tau$  的概率密度, 整条曲线与横坐标轴之间的面积为 1, 代表了不同出行者对应 VOT 的概率总和. 概率密度  $f$  的公式如下:

$$f(\tau) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi}} \tau^{-1} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln \tau - \alpha}{\beta} \right)^2 \right], \quad 0 < \tau < \infty, \beta > 0 \quad (8)$$

$$\alpha = \ln \mu - \frac{1}{2} \beta^2, \beta^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2} \right) \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  即  $\ln \tau$  的均值;  $\beta$  是  $\ln \tau$  的平方差;  $\mu$  和  $\sigma$  分别是  $\tau$  的均值和平方差.

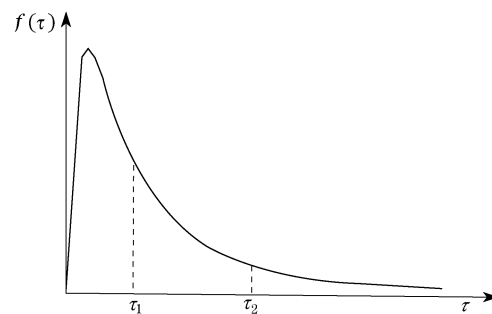


图 2 收费前用户选择不同出行方式的比重

Fig. 2 Travel mode percentage before congestion pricing

图 3 表示的是 3 种出行方式的总费用随 VOT 变化情况. 图 3 中,  $[0, \tau_1], [\tau_1, \tau_2], [\tau_2, \infty]$  这 3 个区间中曲线与横轴之间的面积大小分别表示选择这 3 种出行方式的出行者的概率, 即出行方式的占有率. 这 3 个占有率与总的出行者乘积, 即得到 3 类出行车辆的数量, 即  $v_1, v_2, v_3$ .

均衡状态下的分界  $\tau_1$  和  $\tau_2$  可用迭代法求得.

先设置  $\tau_1$  和  $\tau_2$  的初始值,然后根据 VOT 分布计算 3 类出行方式的交通量.再把该交通量加载到网络上,得到 3 种出行方式的出行费用,根据此费用,按照出行者方式选择的均衡性可计算出分界 VOT.如此循环往复,可得到最终的均衡解  $\tau_1, \tau_2$  和  $v_1, v_2, v_3$ ,以及  $t_1, t_2, t_3$ .

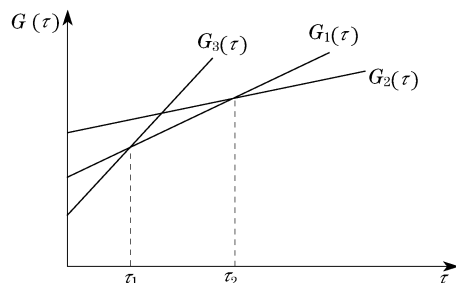


图 3 收费前行者的总交通费用和方式选择  
Fig.3 Generalized cost of different travel modes before congestion pricing

### 3 算例分析

在图 1 的网络上,出行流量总量  $q$  设为 3 000 人;路径 1 的通行能力  $C_1$  设为 1 000 pcu · h<sup>-1</sup>;路径 2 的通行能力  $C_2$  设为 2 000 pcu · h<sup>-1</sup>;近路和远路的自由流行程时间  $t_{0,1}, t_{0,2}$  分别设为 10, 20 min;近路小汽车、远路小汽车和近路公交的出行货币费用  $F_1, F_2, F_3$  分别设为 6 元、8 元、3 元;公交车数  $r$  设为 30 辆,

表 1 收费前后的出行方式转变点计算结果

Tab.1 Critical point of different travel modes before and after congestion pricing

收费前后	转折点	数值	出行方式转变以及交通量
收费前	$\tau_1$	0.15	$\tau \in [0, 0.15]$ 的出行者选择公交出行,交通量为 1 380 人
	$\tau_2$	1.98	$\tau \in [0.15, 1.98]$ 的出行者选择近路出行,交通量为 1 586 人 $\tau \in [1.98, \infty]$ 的出行者选择远路出行,交通量为 34 人
收费后	$\tau'_1$	0.50	$\tau \in [0, 0.5]$ 的出行者选择公交出行,交通量为 2 533 人
	$\tau'_2$	0.80	$\tau \in [0.5, 0.8]$ 的出行者选择远路出行,交通量为 245 人 $\tau \in [0.8, \infty]$ 的出行者选择近路出行,交通量为 222 人

#### 3.2 行程时间分析

收费前后,3 种出行方式的行程时间都发生变化,由公式(2)、(3)、(4)计算出数值如表 2 所示.图 4 中显示了 3 种出行方式的行程时间变化,可以看出:在收费后,远路小汽车出行方式的行程时间基本持平,而另外 2 种出行方式的行程时间都有所降低.

#### 3.3 出行费用变化分析

如图 5 所示的 7 个区块,每个区块代表一种用

不随交通量变化; $k$  为拥挤收费数值,设为 10 元.

#### 3.1 出行方式转变分析

在拥挤收费实施之前,远路出行相比近路需要支付更多的货币费用.所以选择远路出行的用户较少,而在近路上由于车辆过多产生交通堵塞.某种情况下,较远路线反而比近路出行更省时.VOT 较高的用户会选择较省时的远路,因为其节省的时间费用要高于多支付的油耗费用.在对近路实施拥挤收费之后,近路的车流量必然会下降,成为最省时的路径,VOT 较高的用户改为选择近路出行.

由于收费前后存在这种现象,收费前后 VOT 较高的出行者将出行方式由远路调节为近路.而 VOT 适中的出行者由近路调节为远路.而出行方式转变点  $\tau_1, \tau_2$  在意义上也发生了变化.由式(7)、(8)、(9)所代表的数学直线两两相交可以计算出交点  $\tau_1$  和  $\tau_2$ .在收费前, $\tau_1$  代表选择公交出行和近路出行用户的 VOT 转变点, $\tau_2$  代表选择近路出行和远路出行用户的 VOT 转变点;收费后, $\tau'_1$  的意义却变成是选择公交出行和远路出行用户的 VOT 转变点, $\tau'_2$  代表远路出行和近路出行用户的 VOT 转变点.

在出行方式转变点的数值上,由表 1 可以看出,收费前的  $\tau_1$  由 0.15 上升到收费后  $\tau'_1$  为 0.50,收费前的  $\tau_2$  由 1.98 下降到收费后  $\tau'_2$  为 0.80.同时也反映出选择公交出行的用户数量在上升.而其他 2 种出行方式的用户总和在下降.

户,分区的原则有以下 3 项:①收费前后,选择的出行方式发生同样变化的用户群;②收费前后,广义交通费用发生同样变化的用户群;③收费前后,行程时间发生同样变化的用户群.

首先整体通过定性分析得出多种不同用户在收费前后的费用和时间变化,多数用户的广义交通费用和行程时间在收费后都呈现了下降趋势.这说明拥挤收费的实施在经济、省时和减少拥堵方面都有

较好的效果。

表 2 收费前后的各方式行程时间计算结果

Tab.2 Travel time of different travel modes before and after congestion pricing min

收费前后	使用近路汽车 所需时间 $t_1$	使用远路汽车 所需时间 $t_2$	使用近路公交 所需时间 $t_3$
收费前	21	20	40
收费后	10	20	30

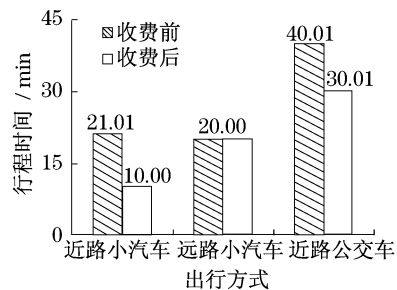


图 4 收费前后各出行方式行程时间对比

Fig.4 Travel time of different travel modes before and after congestion pricing

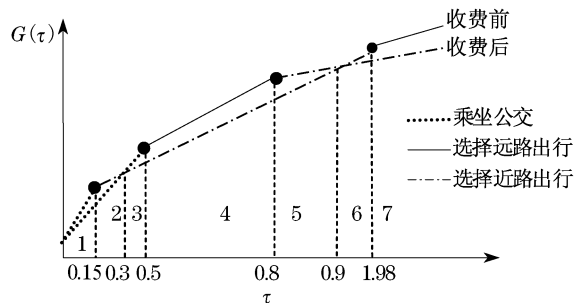


图 5 收费前后的用户出行方式对比图

Fig.5 Travel mode change before and after congestion pricing

下面通过对不同区域的用户分析来观察其收费前后的心理变化,出行方式和费用的变化,见表 3。

表 3 收费前后用户群分类表

Tab.3 Impact of congestion pricing on different travelers

区块	收费前出行方式	收费后出行方式	广义交通费用变化	行程时间变化
1	公交出行	公交出行	下降	下降
2	近路小汽车出行	公交出行	下降	上升
3	近路小汽车出行	公交出行	上升	上升
4	近路小汽车出行	远路小汽车出行	上升	下降
5	近路小汽车出行	近路小汽车出行	上升	下降
6	近路小汽车出行	近路小汽车出行	下降	下降
7	远路小汽车出行	近路小汽车出行	下降	下降

(1) 收费前选择公交出行的用户全部在 1 区,而且收费后其出行方式仍然不变,但是出行的总费用

下降了.通过 VOT 来解释:选择公交的用户 VOT 较低,收费前后他们都不会去选择出行费用较高的小汽车出行,所以方式不变.因为近路上的车流量减少,减小交通堵塞,这样出行时间减少,从而导致公交出行的交通费用也相应减少。

(2) 收费前选择近路出行的用户在收费后发生的变化情况较多,分为 2—6 区:

2 区用户——VOT 较低的近路出行用户在收费后,一方面由于支出过高,另一方面自身的 VOT 较低,选择改换公交车出行,这样其费用也会下降。

3 区用户——该区的用户是最不同意拥挤收费的用户群,因为一方面在拥挤收费后无法负担近路开小汽车的交通费用转为公交出行;另一方面由于他们的时间价值较高,他们的广义交通费用比收费前还是提高了。

4 区用户——在收费后,必然有一部分近路小汽车出行者会改为选择远路出行.首先远路出行方式的行程时间比公交要短.而且针对该部分用户的 VOT,收费后公交出行的广义交通费用会高于远路出行的.所以虽然收费后出行费用上升了,但却是最低的费用选择。

5 区用户——没有更改近路出行方式,虽然其行程时间下降,但因为需要拥挤收费,所以该区域用户的整个广义交通费用仍旧增大。

6 区用户——没有更改近路出行方式,广义交通费用下降.该区用户比较 5 区用户的时间价值更高,虽然需要上交拥挤收费的费用,但通过行程时间下降所节省的费用更多。

(3) 收费前选择远路出行的用户在 7 区.这类用户的时间价值非常高,往往会采用行程时间最短的出行方式来节省时间.收费后,因为转变为近路出行,可以节省大量出行时间,故其广义交通费用也有所降低。

更直观地,通过在用户的分布曲线上显示出其费用和时间的上升和下降来判断其实施的用户公平性,见图 6 和图 7.从经济和省时两方面来看,广义交通费用的上升或者行程时间上升是不期待的.图 6 中 3,4,5 区用户的广义交通费用是上升的;图 7 中 2,3 区用户的行程时间是上升的.然而这些用户分别仅仅占总出行者的 20%和 38%。

广义交通费用和行程时间都产生下降是较为理想的状态.在本文的模型中,52%的用户达到 2 项都降低,从用户公平性角度来看,拥挤收费的效果还是值得肯定的。

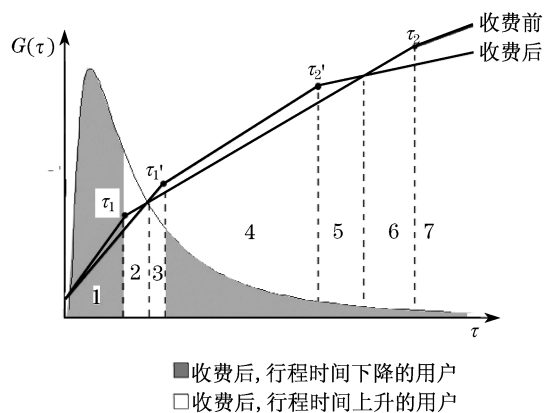


图 6 收费前后用户费用对比图

Fig. 6 Variations of generalized cost before and after congestion pricing

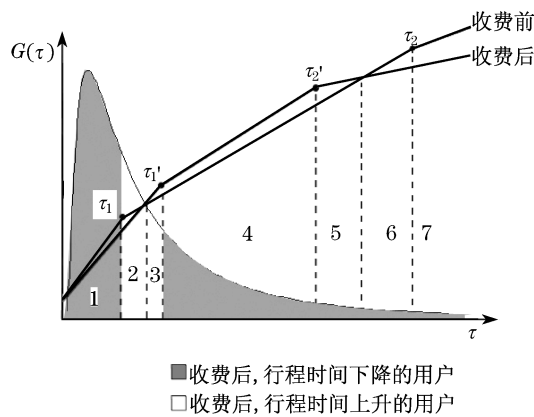


图 7 收费前后行程时间对比图

Fig. 7 Variations of travel time before and after congestion pricing

## 4 结语

在本文中,采用时间价值指标来反映城市居民

的经济收入水平,并建立了一个简单的网络来定量分析拥挤收费对不同居民的影响.具体而言,文章分析了收费前后旅行者出行方式、路径选择和出行费用的变化.研究发现,拥挤收费对不同居民的影响是不一致的,且大多数出行者的行程时间和总体出行费用都呈下降趋势.算例结果表明,公务车辆、广大 VOT 较低的公交乘客和 VOT 较高的驾车族从拥挤收费中获益,只有少量 VOT 较低的驾车族在拥挤收费中受损.

## 参考文献:

- [1] Foster C D, Richardson H W. A note on the distributional effects of road pricing (comment and rejoinder) [J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1975, 9(2): 186.
- [2] Small K A. The incidence of congestion tolls on urban highways [J]. *Journal of Urban Economics*, 1983, 13(1): 90.
- [3] Hauri T D. Economic fundamentals of road pricing: a diagrammatic analysis [J]. *Transportmetrica*, 2005, 1(2): 81.
- [4] Johansson B, Mattson L G. Road pricing: theory, empirical assessment and policy [M]. Boston: Kluwer, 1995: 205 - 221.
- [5] Button K J, Verhoef E T. Road pricing, traffic congestion and the environment: issues of efficiency and social feasibility [M]. Cheltenham: Edward Elgar, 1998: 79 - 110.
- [6] Yang H, Zhang Xiaoning. Multiclass network toll design problem with social and spatial equity constraints [J]. *Journal of Transportation Engineering: ASCE*, 2002, 128(5): 420.
- [7] 张小宁. 交通网络拥挤收费原理 [M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2009.  
ZHANG Xiaoning. Theory of congestion pricing in transportation networks [M]. Hefei: Publishing House of Hefei University of Science and Technology, 2009.
- [8] 刘南, 陈达强. 城市道路拥挤定价理论、模型与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
LIU Nan, CHEN Daqiang. Theory model and practice of urban road congestion pricing [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2009.