

# 基于博弈视角的交通信息提供与道路收费 联合定价模型\*

袁鹏程, 隽志才

(上海交通大学 安泰经济管理学院, 上海 200052)

**摘要:** 针对信息提供和拥堵收费两种交通管制策略,研究了两种策略联合作用下的定价机制。首先构建了政府、信息提供商决策空间,在分析出行者路径选择行为的基础上,给出了交通信息市场占有率计算模型;然后提出了弹性条件下具有/不具有交通信息的混合交通网络均衡分配模型,得到了出行者的决策空间,在此基础上提出了基于博弈视角的交通信息提供与道路收费联合定价模型,设计了求解算法;最后,以一个算例对模型进行了分析。结论表明,社会收益水平及交通信息的质量都会对交通信息及道路收费价格产生显著的影响。此外,模型的算例结果还与经验较为吻合,表明模型的实用性和合理性。

**关键词:** 交通信息; 拥堵收费; 博弈; 联合机制; 定价策略

**中图分类号:** TP301; U491.13

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-3695(2014)01-0152-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.01.036

## Union pricing mechanism of traffic information and road congestion based on game theory perspective

YUAN Peng-cheng, JUAN Zhi-cai

(Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200052, China)

**Abstract:** For the two traffic management strategies of information providing and congestion pricing, this paper studied a union pricing strategy. Firstly, it constructed the decision space of the government and the traffic information supplier, calculated the information market penetration. Then, based on the assumption of elastic demand, it presented an equilibrium model which included two travelers (with/without information), and got the travelers' decision space. It also presented a union pricing model based on the game theory at the same time. Last, it used a testing network to analyze the model. The results show that the level of social benefits influence the information and the congestion pricing more significantly. It also find some results of the model which are in accordance with the practical experience. All of these show the reasonable of the model.

**Key words:** traffic information; congestion pricing; game theory; union mechanism; pricing strategy

### 0 引言

城市交通问题从表面上看是由于交通供需的矛盾造成的,但实际上后面隐藏着深层次的管理问题。交通信息诱导和拥挤道路收费是公认的当今世界各大城市普遍采取的有效缓解城市交通拥堵的两种重要管理措施,也成为近年来交通领域的学者们热衷研究的问题之一<sup>[1,2]</sup>。然而,当前更多的研究只关注于其中某一个因素(信息诱导或者道路收费政策)对于交通系统的影响,而忽略了这两种管理措施共同的作用机制<sup>[3-5]</sup>,只有很少的研究关注到了交通信息与道路收费两种联合管理措施对城市交通系统的影响<sup>[3,6-9]</sup>。城市交通系统的运行过程存在三个重要的主体,即出行者、信息提供商及交通管理者。这三个主体的共同作用最终导致交通系统处于一个相对稳定的状态。出行者通过交通信息来了解交通系统状态,并结合当前交通政策,调节自己的出行行为;信息提供商通过出行流量及交通政策来确定信息的提供方式(如提供信息的质量及价格),使自己的利润最大;交通管理者则通过网络交通流的时

空分布特征来制定交通政策,使交通系统的运行效率最高。由此可见,交通系统的三个主体的目标之间实际上是相互依赖、相互影响的,交通系统最终的稳定状态实际是三个参与的主体之间相互博弈的结果<sup>[10]</sup>。

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<sup>[11]</sup>。在实际中,不仅道路收费政策会影响出行者的出行行为,交通信息的提供也会对出行者的出行行为产生较大的影响<sup>[12-23]</sup>。例如,文献[24]基于是否装备了交通信息装置,将出行者分为具有交通信息的出行者和不具有交通信息的出行者两类,认为具有交通信息的出行者对网络状态的了解程度较高,而不具有交通信息的出行者对网络的了解程度较低,并基于这两种出行者建立了交通网络的均衡分配模型,通过这个模型来分析交通信息的市场占有率问题。

以往的研究更多地关注于分析道路收费或信息提供对于交通系统的影响,而事实上,这两者之间又存在着密不可分的关系。例如文献[10]就认为交通信息市场是由信息服务商、

收稿日期: 2013-04-08; 修回日期: 2013-05-17 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978163)

作者简介: 袁鹏程(1982-),男,山西晋城人,博士研究生,主要研究方向为交通系统建模与分析(danis\_cx@126.com);隽志才(1954-),吉林长春人,教授,博导,主要研究方向为交通运输规划与管理。

出行者以及交通管理机构三者构成的,并且这三者的利益是相互冲突的,因此他们之间的决策也是相互依赖的。文献[25]研究了信息提供与道路收费联合机制对于社会福利的影响,文献[26]则比较了这两种机制对于降低总出行时间的贡献率。本文对联合博弈定价策略进行了进一步研究,即认为城市网络交通流量的最终分布实质是出行者、交通信息提供商、交通管理者三者博弈的结果。

### 1 策略空间及得益分析

本章主要讨论交通市场中三个参与主体:交通管理者、交通信息供应商和出行者的决策目标以及决策空间。在此之前,首先给出相关的符号定义:

$W$  表示交通网络中所有起始点到终止点(OD 对)的集合,  $w \in W$ ;

$\hat{q}^w$  表示交通网络上某 OD 对  $w$  间具有购买交通信息的出行需求量;

$\tilde{q}^w$  表示交通网络上某 OD 对  $w$  间未购买交通信息的出行需求量;

$q^w$  表示交通网络上某 OD 对  $w$  间的总出行需求量,  $q^w = \tilde{q}^w + \hat{q}^w$ ;

$q$  表示交通网络上所有 OD 对的出行需求量之和,  $\sum_w q^w = q$ ;

$K^w$  表示交通网络上某 OD 对  $w$  间所有路径集合,  $k \in K$ ;

$f_k^w$  表示 OD 对  $w$  间路径  $k$  上具有交通信息的流量;

$\tilde{f}_k^w$  表示 OD 对  $w$  间路径  $k$  上没有购买交通信息的流量;

$f_k^w$  表示 OD 对  $w$  间路径  $k$  上的总流量  $f_k^w = \tilde{f}_k^w + f_k^w$ ;

$A$  表示网络上所有路段集合,  $a \in A$ ;

$x_a$  表示网络上路段  $a$  的流量;

$\hat{\theta}$  表示具有交通信息的出行者的信息了解参数;

$\tilde{\theta}$  表示不具有交通信息的出行者的信息了解参数;

$\xi$  表示出行者对节约成本的了解参数;

$\hat{c}^w$  表示 OD 对  $w$  间具有交通信息的出行者总出行费用;

$\tilde{c}^w$  表示 OD 对  $w$  间不具有交通信息的出行者总出行费用;

$t_a$  表示路段  $a$  的出行时间;

$v_a$  表示路段  $a$  上的收费价格,  $v_a \in v$ ;

$c_k^w$  表示 OD 对  $w$  间路径  $k$  上的出行者费用,  $\sum_{a \in A} (t_a + v_a) \delta_{ak}^w$ ;

$s^w$  表示 OD 对  $w$  间购买交通信息与未购买交通信息的出行成本之差,  $s^w = \tilde{c}^w - \hat{c}^w - p_l$ ;

$c_0^w$  表示 OD 对  $w$  间最小的出行成本;

$p_l$  表示交通信息价格。

#### 1.1 交通管理者决策空间

交通管理者是交通系统重要的参与方,交通管理者通过制定交通政策,最大限度地保证交通系统运行的效率。一方面交通管理者可以通过政策措施提供交通系统的服务水平,使得更多的出行者利用交通系统,从而提高社会的运行效率;另一方面还要尽可能地降低出行者在交通系统的费用损耗。所以,交通管理者的决策过程是一个非常复杂的问题,因为通过政策引导过量地增加交通需求,可能会导致交通系统低的运转效率,最终导致交通系统中巨大的费用损耗(因为存在拥挤效应)。假设交通系统中每增加一个人的出行给社会带来的正的收益为  $B$ ,交通管理者通过制定最优的收费价格  $v_a$ ,使得最大化社会效益以及最小化出行时间费用,即使目标函数式(1)取得最大值。

$$Z_1 = B \sum_{w \in W} q^w - \sum_{a \in A} x_a [t_a(x_a) + \beta v_a] \quad \forall v_{\min} \leq v_a \leq v_{\max} \quad (1)$$

其中:式(1)右边第一项表示交通系统中出行者带来的总的社会效益;第二项表示出行者出行费用; $\beta$ 为一常数,表示时间与费用转换系数。

#### 1.2 信息提供商的决策空间

信息提供商尽可能提供精确的信息,获得信息使用者的认可,使出行者尽可能地购买自己的信息。但实际中,信息提供商并不可能提供绝对精确的信息。信息提供商提供信息的质量与成本成正比,即如果信息提供的质量越高,信息提供商的研发成本应该越大(交通信息的可变成本越大)。同时,由于规模经济的存在,如果购买信息的人越多,同一质量水平交通信息的可变成本又会下降,则信息提供商可以通过制定最优的信息价格  $P_l$  使得自己的利润最大。信息提供商的得益函数可以写成

$$Z_2 = \sum_{w \in W} \hat{q}^w (p_l - \gamma \hat{\theta} - \int_0^{\hat{q}^w} (\rho + e^{-\mu x}) dx) \quad (2)$$

其中: $\hat{\theta}$ 表示交通信息的质量(其具体含义参见1.3节模型); $\alpha$ 是一个常数; $\gamma \hat{\theta}$ 表示生产每单位质量为  $\hat{\theta}$  的交通信息所需要耗费的固定成本; $\int_0^{\hat{q}^w} (\rho + e^{-\mu x}) dx$ 表示由于规模经济所带来的每单位交通信息可变成本的下降,它是交通信息需求量的严格单调减函数,表明交通信息需求量越大,其生产的可变成本会越小。

#### 1.3 出行者决策空间

出行者的决策也是一个非常复杂的过程,交通网络中的出行者须根据出行费用来选择是否出行以及选择哪条路径出行,并且根据网络出行费用的节约情况来选择是否购买交通信息。先前的研究都对交通网络中交通信息的市场渗透率进行了研究,这些研究都假设交通需求是固定的。由于出行者需要根据出行费用决定是否出行,故本节需要对以往的模型进行拓展,即认为网络中的交通需求是弹性的,并对弹性需求下交通信息的市场渗透率进行建模。

在交通网络中存在着两类出行者:一类为使用交通信息的出行者;另一类为不使用交通信息的出行者。网络上任一 OD 对  $w$  的出行需求取决于此 OD 对  $w$  路径上的最小出行费用,即

$$q^w = D^w(\pi) \quad (3)$$

其中: $D^w(\cdot)$ 为需求函数,它是出行费用的单减函数; $\pi$ 表示网络均衡后 OD 对  $w$  间所有路径的平均出行费用,即

$$\pi = \frac{1}{n} \sum_{k \in K^w} c_k^w \quad (4)$$

其中:  $c_k^w = \sum_{a \in A} [t_a(x_a) + \beta v_a] \delta_{ak}^w$  (5)

$n$  为 OD 对  $w$  间的路径数。

由于信息提供商不可能提供完全精确的交通信息,所以网络上具有交通信息的出行者也只能依据随机用户最优原则进行路径选择,即对某特定 OD 对  $w$ ,每条路径的选择概率为

$$\hat{p}_k^w = \frac{\exp(-\hat{\theta} c_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(-\hat{\theta} c_k^w)} \quad (6)$$

其中: $\delta_{ak}^w$ 是0-1变量, $\delta_{ak}^w = 1$ 表示路段  $a$  在 OD 对  $w$  间的路径  $k$  上; $\hat{\theta}$ 表示信息的质量, $\hat{\theta}$ 越大表明信息的质量越高。对于不具有交通信息的出行者,其路径选择同样遵循随机用户最优原则,但是由于其没有交通信息,只能依靠经验判断,因此  $\tilde{\theta} \ll \hat{\theta}$ 。对于不具有交通信息的出行者,其路径选择概率为

$$\tilde{p}_k^w = \frac{\exp(-\tilde{\theta}c_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(-\tilde{\theta}c_k^w)} \quad (7)$$

根据文献[24]对交通信息市场渗透率的分析思路,出行者是否使用交通信息取决于交通信息的使用是否可以他们的出行节省费用。如果在一个 OD 对  $w$  间,使用交通信息后所节省的费用越大,出行者就越趋向于购买交通信息。交通信息的市场渗透率可以表示为

$$\eta^w = \frac{1}{1 + \exp[\alpha + \beta(-s^w)]} = \frac{1}{1 + \exp[\alpha + \beta(-\tilde{c}^w + \hat{c}^w + p_l)]} \quad (8)$$

其中: $\eta^w$  表示 OD 对  $w$  间购买交通信息的出行者占整个出行需求的比例; $\alpha$ 、 $\beta$  为待定系数; $s^w = \tilde{c}^w - \hat{c}^w - p_l$  表示使用交通信息后节约的出行成本; $\tilde{c}^w$  和  $\hat{c}^w$  分别为

$$\tilde{c}^w = \sum_{k \in K^w} \tilde{p}_k^w c_k^w, \hat{c}^w = \sum_{k \in K^w} \hat{p}_k^w c_k^w \quad (9)$$

作为博弈主体的一方,出行者根据出行费用(信息价格、道路收费)、节约费用及道路的拥挤程度来决策是否出行(出行需求)、是否购买交通信息以及如何选择出行路径。出行者的决策空间可以通过求解非线性规划模型式(10)获得。

$$\min Z(\tilde{f}, \hat{f}, q^w) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} [t_a(x_a) + v_a] dx + \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K^w} \tilde{f}_k^w \ln \hat{f}_k^w + \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K^w} \tilde{f}_k^w \ln \hat{f}_k^w - \sum_{w \in W} \int_0^{q^w} D^{-1}(w) dw \quad (10a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in K^w} \tilde{f}_k^w = \eta^w q^w \quad w \in W \quad (10b)$$

$$\sum_{k \in K^w} \hat{f}_k^w = (1 - \eta^w) q^w \quad w \in W \quad (10c)$$

$$\tilde{f}_k^w \geq 0, \hat{f}_k^w \geq 0 \quad w \in W \quad (10d)$$

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K^w} (\tilde{f}_k^w + \hat{f}_k^w) \delta_{ak}^w \quad a \in A \quad (10e)$$

$$q^w \geq 0 \quad w \in W \quad (10f)$$

这里简单地对模型的等价性进行证明。模型式(10)的拉格朗日函数为

$$L(\tilde{f}, \hat{f}, q^w, \lambda, \mu) = Z(\tilde{f}, \hat{f}, q^w) - \sum_{w \in W} \lambda_w (\sum_{k \in K^w} \tilde{f}_k^w - \eta^w q^w) - \sum_{w \in W} \mu_w (\sum_{k \in K^w} \hat{f}_k^w - (1 - \eta^w) q^w) \quad (11)$$

根据最优性条件,式(11)须满足

$$\frac{\partial L(\tilde{f}, \hat{f}, q^w, \lambda, \mu)}{\partial \tilde{f}} = 0, \frac{\partial L(\tilde{f}, \hat{f}, q^w, \lambda, \mu)}{\partial \hat{f}} = 0, \frac{\partial L(\tilde{f}, \hat{f}, q^w, \lambda, \mu)}{\partial q^w} = 0 \quad (12)$$

根据式(12)可以得出

$$\frac{\partial L(\tilde{f}, \hat{f}, q^w, \lambda, \mu)}{\partial \tilde{f}} = \frac{1}{\theta} (\ln \tilde{f}_k^w + 1) + \sum_{a \in A} [t_a(x_a) + v_a] \delta_{ak}^w - \lambda_w = 0 \quad (13a)$$

$$\frac{\partial L(\tilde{f}, \hat{f}, q^w, \lambda, \mu)}{\partial \hat{f}} = \frac{1}{\theta} (\ln \hat{f}_k^w + 1) + \sum_{a \in A} [t_a(x_a) + v_a] \delta_{ak}^w - \mu_w = 0 \quad (13b)$$

$$\frac{\partial L(\tilde{f}, \hat{f}, q^w, \lambda, \mu)}{\partial q^w} = [\lambda_w \eta^w + \mu_w (1 - \eta^w)] - D^{-1}(q^w) = 0 \quad (13c)$$

式(13)可进一步写为

$$\tilde{f}_k^w = \exp[-\tilde{\theta}(c_k^w - \lambda_w)] \quad (14a)$$

$$\hat{f}_k^w = \exp[-\tilde{\theta}(c_k^w - \mu_w)] \quad (14b)$$

$$[\lambda_w \eta^w + \mu_w (1 - \eta^w)] - D^{-1}(q^w) = 0 \quad (14c)$$

再结合约束条件式(10b~10f)便可以得出

$$\hat{p}_k^w = \frac{\tilde{f}_k^w}{\hat{f}_k^w} = \frac{\exp(-\tilde{\theta}c_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(-\tilde{\theta}c_k^w)} \quad (15a)$$

$$\tilde{p}_k^w = \frac{\tilde{f}_k^w}{q^w} = \frac{\exp(-\tilde{\theta}c_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(-\tilde{\theta}c_k^w)} \quad (15b)$$

$$q^w \{ [\lambda_w \eta^w + \mu_w (1 - \eta^w)] - D^{-1}(q^w) \} \geq 0 \quad (15c)$$

式(15c)中, $\lambda_w \eta^w + \mu_w (1 - \eta^w)$ 可理解为 OD 对  $w$  间的平

均出行费用。显然式(15)正是网络的均衡条件。再由目标函数及约束条件的严格凸性可知模型定有唯一解。

由于模型式(10)中既含有路段,又含有路径,故模型式(10)的求解过程还需要列出最短路径,本文采用改进的 Dial 算法。模型式(10)的有效路径算法如下:

首先对变量的意义作以下说明: $l$  表示搜索的层次,依次取自自然数 1、2、3...; $n(l)$  表示  $l$  层的有效节点数目; $v(l, i)$  表示第  $l$  层的第  $i$  个节点,取值 1、2、3... $n(l)$ ; $s(l, i)$  表示与第  $l$  层的第  $i$  个节点相邻近的节点集合; $p(l, i)$  表示  $l$  层的第  $i$  个节点到起点  $v_r$  的路径节点序列; $v_s$  表示终点。

a)初始化。输入起始节点  $v_r$  和终止节点  $v_s$  及路网结构,令  $l=0, v(0, 1) = v_r, p(0, 1) = v_r$ 。

b)顶点检查。置  $l=l+1$ ,令  $n(l) = 0$ ,对于第  $l-1$  层中的第  $k$  个顶点  $v(l-1, k)$  ( $v(l-1, k) \neq v_s$ ),依次对  $s(l-1, k)$  中的每个节点  $s(l-1, k_i)$  ( $s(l-1, k_i)$  表示与第  $l-1$  层的第  $k$  个节点相邻近的节点集合中的第  $i$  个节点)作出如下判断:若  $v(l-1, k)$  与  $p(l-1, k)$  中的所有顶点相异,则置  $n(l) = n(l) + 1, v(l, n(l)) = v$ ,并将顶点  $v(l, n(l))$  置于路径  $p(l-1, k)$  的最后,得到路径  $p(l, n(l))$ ;否则在顶点处结束分层,考虑  $s(l-1, k)$  中下一个编号的顶点。重复以上判断,直至  $s(l-1, k)$  中所有的顶点列被检查完毕。

c)终止性检查。对于第  $l$  层中的所有顶点  $v(l, k)$ ,若存在  $k(k=1, 2, \dots, n(l))$ ,使得  $v(l, k) \neq v_s$ ,则返回 b);否则取最终层号  $l=l+1$ 。

d)路径追踪。令路径号  $a=0$ ,在所有层次中,依次搜索各个顶点,若存在  $k(k=1, 2, \dots, n(l))$ ,使得  $v(l, k) \neq v_r$  ( $l=1, 2, \dots, L$ ),则置  $a=a+1$ ,输出  $p(a) = p(l, k)$ ,算法终止。

在列出有效路径以后,模型式(10)的求解过程就非常简单,一般的非线性规划算法都可以用来求解模型式(10),本文采用最常用的 F-W 算法来求解此模型。

### 1.4 各博弈方的决策冲突

交通管理者通过制定道路收费价格  $v_a \in [v_{\min}, v_{\max}]$ ,使自己的目标函数式(1)最大;交通信息提供商通过制定信息价格  $p_l \in [0, +\infty]$ ,使自己的利润式(2)最大;而出行者通过决策出行总量  $q^w \in [0, +\infty]$  以及购买信息总量  $\hat{q}^w \in [0, q^w]$ ,使目标函数式(10a)最小。在以上决策目标下,三个博弈方的决策策略是相互冲突的,没有任何一个博弈方可以不顾其他博弈方的策略而选择一个固定的策略使自己的目标最优。

## 2 古诺博弈定价分析及求解算法

本章主要讨论所有博弈参与方都是平等的市场模式下的古诺寡头博弈定价策略,即认为在交通市场中仅有政府及信息提供厂商两个竞争者,这两个竞争者同时考虑对方的定价策略,并根据对方的策略同时作出自己的定价策略。可以表达为

$$\left. \begin{aligned} \max Z_1 = B \sum_{w \in W} q^w - \sum_{a \in A} x_a [t_a(x_a) + v_a] \quad \forall v_{\min} \leq v_a \leq v_{\max} \quad (a) \\ \max Z_2 = \sum_{w \in W} \hat{q}^w (p_l - \gamma \hat{\theta} - \int_0^{\hat{q}^w} (\rho + e^{-\mu x}) dx) \quad (b) \end{aligned} \right\} (16)$$

其中: $q^w$ 、 $x(x_a)$  的集合)、 $\hat{q}^w$  由数学规划模型式(10)计算得出。求解算法如下:

a)初始化。令迭代步数  $n=0$ ,给定初始道路收费价格  $v_{(0)}$ 、信息价格  $p_{l(0)}$  及网络零流出行时间  $t_{(0)}$ 。

b) 将  $p_{I(0)}$  代入式(8), 计算交通信息的市场渗透率  $\eta$ 。

c) 将  $v_{(n)}$ 、 $p_{I(n)}$  及  $\eta$  代入式(10), 得到第  $n$  步后的结果

$q_{(n)}^w$ 、 $\hat{q}_{(n)}^w$ 、 $\tilde{q}_{(n)}^w$ 、 $x_{(n)}$ 。

d) 将第  $n$  步结果  $q_{(n)}^w$  及  $x_{(n)}$  代入式(16a), 求得最优收费价格  $v_{(n+1)}$ 。

e) 将第  $n$  步结果  $\hat{q}_{(n)}^w$  代入式(16b), 求得最优信息价格

$p_{I(n+1)}$ 。

f) 收敛性检查。如果  $\|v_{(n+1)} - v_{(n)}\| \leq \varepsilon_1$  且  $\|p_{I(n+1)} - p_{I(n)}\| \leq \varepsilon_2$ , 则停止迭代; 否则转入 c)。

由于本博弈模型十分复杂, 无法利用解析的方法得出相关结论, 故这里采用算例仿真的方法, 以期从模型的数值解规律来得到一些规律。采用如图 1 所示的包括 12 个节点、17 条路段的算例网络来进行数值结果分析。

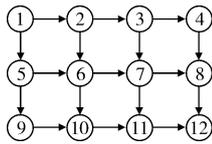


图 1 算例网络

路段的行程时间函数采用最常用的 BPR 函数形式

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left\{ 3.0 + 0.5 \left( \frac{x_a}{C_a} \right)^4 \right\} \quad (17)$$

需求函数为

$$q^w = 5000 - 20\pi^{1.5} \quad (18)$$

各路段的自由行程时间及通行能力属性如表 1 所示。

表 1 各路段自由行程时间及通行能力

| 路段  | 自由行程时间 $t_a^0$ | 通行能力  | 路段    | 自由行程时间 | 通行能力  |
|-----|----------------|-------|-------|--------|-------|
| 1,2 | 20             | 1 000 | 7,8   | 13     | 1 000 |
| 2,3 | 23             | 500   | 5,9   | 24     | 800   |
| 3,4 | 17             | 500   | 6,10  | 20     | 500   |
| 1,5 | 18             | 1 500 | 7,11  | 26     | 500   |
| 2,6 | 19             | 500   | 8,12  | 19     | 1 000 |
| 3,7 | 16             | 500   | 9,10  | 7      | 800   |
| 4,8 | 22             | 500   | 10,11 | 18     | 800   |
| 6,7 | 14             | 1 000 | 11,12 | 17     | 800   |
| 5,6 | 17             | 1 000 |       |        |       |

令模型中的未知参数分别为:  $\beta = 50, \gamma = 5.0, \rho = 3.0, \mu = 1.0, \theta = 1, v_{\min} = 0, v_{\max} = 20, \bar{\theta} = 0.01$ 。则在不同社会收益水平的条件下 ( $B = 10, 20, \dots, 200$ ), 均衡信息价格随参数  $B$  的变化规律如图 2 所示。网络的路段收费均衡价格如表 2~5 所示(这里只给出  $B = 10, 20, 100, 200$  时的结果)。

表 2  $B = 10$  时各路段收费价格

| 路段  | 收费价格 $v_a^*$ | 路段   | 收费价格 $v_a^*$ | 路段    | 收费价格 $v_a^*$ |
|-----|--------------|------|--------------|-------|--------------|
| 1,2 | 4.763 2      | 4,8  | 0.000 0      | 7,11  | 0.000 0      |
| 2,3 | 0.000 0      | 6,7  | 0.002 3      | 8,12  | 0.000 0      |
| 3,4 | 0.000 0      | 5,6  | 0.000 0      | 9,10  | 2.066 2      |
| 1,5 | 0.338 9      | 7,8  | 1.198 7      | 10,11 | 1.178 6      |
| 2,6 | 0.000 0      | 5,9  | 0.000 0      | 11,12 | 3.899 3      |
| 3,7 | 0.000 0      | 6,10 | 0.000 0      |       |              |

表 3  $B = 20$  时各路段收费价格

| 路段  | 收费价格 $v_a^*$ | 路段   | 收费价格 $v_a^*$ | 路段    | 收费价格 $v_a^*$ |
|-----|--------------|------|--------------|-------|--------------|
| 1,2 | 4.791 2      | 4,8  | 0.000 0      | 7,11  | 0.000 0      |
| 2,3 | 0.013 5      | 6,7  | 2.167 8      | 8,12  | 0.011 2      |
| 3,4 | 0.000 0      | 5,6  | 0.000 0      | 9,10  | 4.093 4      |
| 1,5 | 0.345 3      | 7,8  | 3.543 6      | 10,11 | 1.177 7      |
| 2,6 | 0.001 9      | 5,9  | 0.000 0      | 11,12 | 3.899 3      |
| 3,7 | 0.000 0      | 6,10 | 0.110 0      |       |              |

表 4  $B = 100$  时各路段收费价格

| 路段  | 收费价格 $v_a^*$ | 路段   | 收费价格 $v_a^*$ | 路段    | 收费价格 $v_a^*$ |
|-----|--------------|------|--------------|-------|--------------|
| 1,2 | 8.881 0      | 4,8  | 2.056 4      | 7,11  | 4.034 2      |
| 2,3 | 1.013 5      | 6,7  | 5.030 1      | 8,12  | 2.076 3      |
| 3,4 | 0.986 0      | 5,6  | 0.000 0      | 9,10  | 7.732 5      |
| 1,5 | 4.345 3      | 7,8  | 6.331 7      | 10,11 | 10.540 8     |
| 2,6 | 3.765 8      | 5,9  | 2.372 3      | 11,12 | 7.554 1      |
| 3,7 | 1.003 4      | 6,10 | 1.189 0      |       |              |

表 5  $B = 200$  时各路段收费价格

| 路段  | 收费价格 $v_a^*$ | 路段   | 收费价格 $v_a^*$ | 路段    | 收费价格 $v_a^*$ |
|-----|--------------|------|--------------|-------|--------------|
| 1,2 | 8.891 3      | 4,8  | 2.678 3      | 7,11  | 4.002 5      |
| 2,3 | 1.139 0      | 6,7  | 8.814 3      | 8,12  | 1.983 3      |
| 3,4 | 0.986 0      | 5,6  | 0.009 1      | 9,10  | 9.190 1      |
| 1,5 | 4.372 2      | 7,8  | 7.701 7      | 10,11 | 10.665 9     |
| 2,6 | 3.768 9      | 5,9  | 2.451 3      | 11,12 | 7.595 1      |
| 3,7 | 0.573 5      | 6,10 | 0.000 4      |       |              |

从均衡结果图 2 可以看出, 随着社会收益水平  $B$  的增加, 信息价格  $p_I$  是降低, 在  $B = 30$  时,  $p_I$  降为最低, 但是随着参数  $B$  的增加,  $p_I$  又逐渐变大, 当  $B > 100$  时,  $p_I$  增加速度变得缓慢, 基本保持在一个稳定的水平。这个规律说明, 在一些社会收益水平很低的城市中, 交通信息提供商并不能够通过最低价来获得更大利润。这个现象可以解释为在一些经济发展水平很低的城市中, 出行者对出行时间的浪费所表现出的弹性并不敏感, 是人们的时间成本过低所在。但随着社会收益水平的增加, 出行者对时间价值的敏感性会逐渐增加。这时信息提供厂商通过降价可以吸引更多的需求, 保证自己的利润最大化。当社会经济发展达到相对较高水平时, 人们的时间成本会变得很高, 出行者都希望通过交通信息的提供尽可能缩短自己的出行时间, 以降低出行时间成本, 这时信息提供商便可以通过提价使自己获利最高。但是由于信息提供商的价格策略受出行者和政府决策的影响, 当社会经济发展水平达到一定条件时, 社会收益参数  $B$  对均衡价格的影响将比较有限。从表 2~4 还可以看出, 随着参数  $B$  的增加, 路段 1→2、1→5、10→11、11→12 的收费价格都有一定的提高, 而路段 6→7、7→8、9→10 则有相对较为显著的提高。仔细分析不难发现, 路段 6→7、7→8、9→10 相对其他路段具有较小的自由行程时间以及较大的通行能力。由于随着  $B$  的增加, 出行者时间成本也在增加, 此时需要通过对这些敏感路段进行收费, 使得出行时间总费用降低。这与一般的经验认识是相符合的。虽然对某些路段实施了一定程度的收费, 但是整个社会效益却是增加的 ( $Z_1$  从 1 789.3 增加到 1 839.2)。

继续讨论交通信息质量对定价的影响。在  $\beta = 50, \gamma = 5.0, \rho = 3.0, \mu = 1.0$ , 保持  $\bar{\theta} = 0.01$  的条件下, 在社会效益参数  $B$  分别为 10、100、200 时, 当  $\theta$  分别由 1 增加到 10 时, 最终博弈模型达到均衡。在不同信息质量水平下交通信息价格变化规律如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 在其他条件不变的情况下, 当  $B$  分别为 10、100、200 时, 随着  $\theta$  的增加, 交通信息的均衡价格均呈现出递增趋势, 但是这种趋势随着  $B$  的增加变得更加明显。这一现象可以解释为: 在经济发展水平较低的城市中, 出行者的时间成本较低, 故无论信息质量如何, 出行者对其需求的弹性都不大, 这时即使信息提供商通过提高信息质量提价, 也不能获得更优的利润; 相反, 在经济发展水平较高的城市中, 出行成本的增加使得出行者对信息的需求弹性变大, 这时信息提供商通过提高信息质量来提供信息价格的做法可以使自己获得更

大的利润。这个分析为信息提供商的定价策略提供了一定的依据。

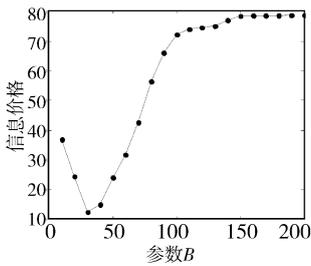


图2 信息定价随参数B的变化趋势

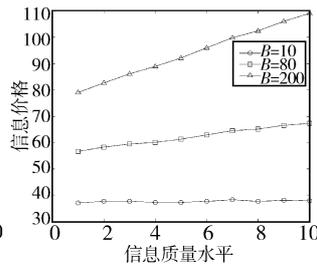


图3 交通信息价格随信息质量变化规律

### 3 结束语

本文基于博弈视角,认为交通信息及道路收费均衡价格最终由政府和信息提供商通过对出行者路径选择行为的影响而导致。首先假设出行者是一个虚拟的主体,出行者会根据 OD 对间的总出行成本来选择是否出行,而 OD 对间的总出行成本不仅取决于 OD 对间的流量分布情况,还取决于 OD 对间的道路收费政策和交通信息的价格。道路收费政策对于出行成本的影响是容易理解的。之所以还取决于交通信息的价格,是因为部分出行者可以通过购买交通信息来获得精确的出行信息,降低出行成本。但是也正如以往的研究结论,出行者不会总是期望购买信息的,如果购买信息的成本大于由于信息带来的节约成本,出行者就不会再购买信息。因此,如果将出行者看成一个博弈主体,那么出行者的博弈过程实际就是根据道路收费价格及信息价格来决定出行者数量、信息购买数量,并根据随机用户最优原则确定网络交通流量分布。交通信息提供商则根据市场上潜在的需求(出行者总量及需要购买交通信息的出行者数量)来确定信息的价格,使自己获得最大利润。表面上看,信息价格是根据需求来制定的,但是仔细审查后不难发现,信息的价格制定是通过出行者间接受到道路收费价格影响的。最后,交通管理者根据网络交通流量的分布情况来确定收费策略,使交通系统运行效率最高。同理,通过出行者,交通管理者的实际道路收费价格也需要考虑到信息的价格制定。

在以上分析的基础上,本文首先构建了政府、信息提供商决策空间,在分析出行者路径选择行为的基础上,给出了交通信息市场占有率计算模型;基于弹性需求,提出了具有交通信息和不具有交通信息两种出行者混合条件下的网络均衡分配模型,并对模型解的等价性、解存在性和唯一性进行了证明;在此基础上提出了基于博弈视角的交通信息提供与道路收费联合定价模型,设计了求解算法。以一个算例对模型的仿真结果进行了分析,结论表明,社会收益水平及交通信息的质量都会对交通信息及道路收费价格产生显著的影响。在较低的经济发展水平的条件下,信息的价格不会总表现是很低,并且提高信息质量无助于信息提供商获得更大的利润;而在社会经济发展水平达到一定水平的条件下,信息价格随经济发展水平变化的弹性将大大降低,此时,信息提供商可以通过提供信息质量并提价的策略获得更大利润。此外,模型的算例结果还与经验相吻合,表明模型的实用性和合理性。本文模型可以为政府及信息提供商的价格制定策略提供参考依据。

#### 参考文献:

[1] 林勇,余志,何兆成. 交通仿真系统中车辆出发时间分布模式研究[J]. 系统工程学报,2011,26(6):801-808.

[2] 王昕,黄海军. 多用户弹性需求网络的双准则系统最优交通分配[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(1):94-102.

[3] ZHANG Xiao-ning, ZHANG H M, HUANG Hai-jun, et al. Competitive, cooperative and stackelberg congestion pricing for multiple regions in transportation networks [J]. *Transportmetrica*, 2011, 7(4):297-320.

[4] ENRIQUE-FERNÁNDEZ L J, De CEA C J, VALVERDE G G. Effect of advanced traveler information systems and road pricing in a network with non-recurrent congestion [J]. *Transportation Research Part A*, 2009,43(5):481-499.

[5] 张小宁. 实时交通信息诱导下的出行模式及效益评价[J]. 管理科学学报,2011,14(9):13-20.

[6] VERHOEF E T, EMMERINK R H M, NIJKAMP P, et al. Information provision, flat-and fine congestion tolling and the efficiency of road usage[J]. *Regional Science and Urban Economics*, 1996, 26(5):505-529.

[7] De PALMA A, LINDSEY R. Information and usage of congestible facilities under different pricing regimes [J]. *Canadian Journal of Economics*, 1998, 31(3):666-692.

[8] YANG Hai. Evaluating the benefits of a combined route guidance and road pricing system in a traffic network with recurrent congestion[J]. *Transportation*, 1999, 26(3):299-322.

[9] ZHANG Rong, VERHOEF E T. A monopolistic market for advanced traveler information systems and road use efficiency[J]. *Transportation Research Part A*, 2006, 40(5):424-443.

[10] LO H K, SZETO W Y. A methodology for sustainable travel information services[J]. *Transportation Research Part B*, 2002,36(2):113-130

[11] 唐毓敏,冯苏苇. 政策博弈下的道路交通拥挤定价[J]. 管理科学学报,2008,11(4):76-82.

[12] VERHOEF E T, NIJKAMP P, RIETVELD P. Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative [J]. *Journal of Urban Economics*, 1996,40(3):279-302.

[13] YANG Hai, HUANG Hai-jun. Principle of marginal-cost pricing: how does it work in a general network? [J]. *Transportation Research Part A*, 1998,32(1):45-54.

[14] SMALL K A, VERHOEF E T. The economics of urban transportation [M]. London: Routledge, 1979:237-242.

[15] SUMALEE A. Multi-concentric optimal charging cordon design[J]. *Transportmetrica*, 2007, 3(1):41-71.

[16] YANG Hai, TANG W H, CHEUNG W M, et al. Profitability and welfare gain of private toll roads with heterogeneous users[J]. *Transportation Research Part A*, 2002,36(6):537-554.

[17] EMMERINK R M, AXHAUSEN K, NIJKAMP P, et al. The potential of information provision in a simulated route transport network with non-recurrent congestion [J]. *Transportation Research Part C*, 1995, 3(5):293-309.

[18] YANG Hai, LAM W H K. Optimal road tolls under conditions of queuing and congestion [J]. *Transportation Research Part A*, 1996,30(5):319-332.

[19] 徐寅峰,余海燕,苏兵,等. 基于时间和路径选择偏好的交通流分配模型与诱导策略[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(10):2306-2314.

[20] LEVINSON D. The value of advanced traveler information systems for route choice[J]. *Transportation Research Part C*, 2003,11(1):75-87.

[21] 徐红利,周晶,徐薇. 基于累积前景理论的随机网络用户均衡模型[J]. 管理科学学报,2011,14(7):2-7.

[22] 陈星光,周晶,李卓君,等. 多维动态用户最优出行选择的变分不等式模型[J]. 管理工程学报,2009,23(1):23-28.

[23] JOU R C. Modeling the impact of pre-trip information on commuter departure time and route choice[J]. *Transportation Research Part B*, 2001,35(10):887-902.

[24] YANG Hai. Multiple equilibrium behaviors and advanced traveler information systems with endogenous market penetration[J]. *Transportation Research Part B*, 1998, 32(3):205-218.

[25] KOBAYASKI K, DO M. The informational impacts of congestion tolls upon route traffic demands[J]. *Transportation Research Part A*, 2005,39(7-9):651-670.

[26] GARDNER L M, BOYLES S D, WALLER S T. Quantifying the benefit of responsive pricing and travel information in the stochastic congestion pricing problem [J]. *Transportation Research Part A*, 2011,45(3):204-218.