

文章编号: 1002-0268 (2005) 10-0124-05

# 高速公路可变收费标准模型研究

任英伟, 陆 键, 项乔君, 王海燕  
(东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 在介绍可变收费的理论基础上, 分析影响高速公路可变收费标准制定的主要因素, 并讨论不同时段收费费率同交通量的关系。在设定的可变收费方案下, 建立了出行者选择的二元 logit 模型, 根据调研样本, 采用最小二乘法对模型参数标定并对设定的可变收费方案进行评价, 结果证明可变收费能使交通流在各时段合理分布, 从而提高了高速公路的服务水平。

**关键词:** 可变收费; Logit 模型; 交通需求; 出行选择

**中图分类号:** U491

**文献标识码:** A

## Study on Variable Pricing Model for Expressway

REN Ying-wei, LU Jian, XIANG Qiao-jun, WANG Hai-yan

(Transportation College of Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The paper introduces the theory of variable pricing, analyzes factors affecting variable pricing and discusses the relation between toll rate and traffic volume at different time. Given a scheme of variable pricing, a binary logit model of traveler choice is built. According to the results of traveler characteristics study, the parameters of model are gained through method of least squares and the effect of the supposed scheme is evaluated. It indicates that variable pricing can make traffic flow distribution more rational and improve the service level of expressway.

**Key words:** Variable pricing; Logit model; Traffic demand; Traveler's choice

## 0 引言

20 世纪 80 年代初, 我国开始着手高速公路建设, 特别是在国道主干线公路系统规划被批准实施后, 各地高速公路建设更是日新月异。随着经济的发展, 高速公路的交通量增长迅速, 许多地区已经出现了高速公路不高速的状况。

如沪宁高速公路设计日交通流量为 48 000 辆次, 2003 年日均车流量已达 4 万多辆次, 最高日流量更达 7 万辆次, 而车流量仍以每年至少 20% 的速度递增。目前由南京至上海的大巴客车如不堵车也需要 5h 多, 比以往的 3h45min 多出了整整 1h。

根据沪宁高速 2003 年 2 月份的交通量数据, 苏州新区到苏州东断面在工作日总交通量及大中型货车交通量随时间变化的趋势如图 1 所示。

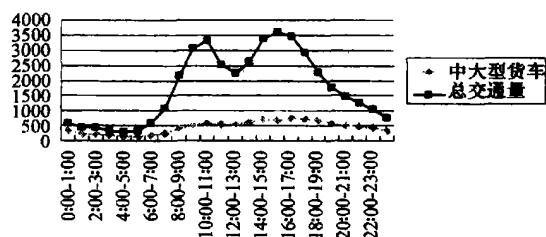


图 1 沪宁高速苏州新区到苏州东断面工作日分时段交通量示意图

收稿日期: 2004-11-03

基金项目: 江苏省交通厅科技项目 (04X13)

作者简介: 任英伟 (1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为交通运输规划与管理、智能交通系统. (renyingweicy@sohu.com)

从图中可以看出, 高峰时段交通量远远大于其他时段交通量, 且各时段交通量分布很不均匀。因此如何有效地使交通流在不同的时间段得到合理分布, 缓解高峰时段拥堵, 提高高速公路运行效率, 是目前急需解决的问题。

本文依托江苏省交通厅科研项目《江苏省高速公路可变收费标准及对交通流分布影响的研究》所做的调查和研究, 对可变收费标准的制定及其对交通流的影响进行分析探讨。

### 1 可变收费的理论基础

可变收费即是在不同时段上(包括周 1 至周日之间及每天 0 点至 24 点之间)采用不同的收费标准, 如在高峰时段采用较高的收费标准, 而在低峰时段采用较低的收费标准, 使得一部分原本高峰时段的交通量通过经济及管理手段可分流到低峰时段, 达到交通量分布的相对合理。

根据先进国家(如美国)在可变收费研究和应用的总结, 可变收费有 3 大优点<sup>[1~4]</sup>: (1) 可有效调控高速公路交通量在不同时段的分配, 达到优化通行能力和提高服务水平的目的; (2) 可优化收费标准, 提高运营收入; (3) 由于交通量的合理分布, 可提高高速公路上的安全性。

可变收费同拥挤收费<sup>[7,8]</sup>的主要不同在于拥挤收费只在高峰时段对拥挤路段收费(原不收费公路)或提高收费标准(原收费公路), 而可变收费不仅可在高峰时段提高收费标准, 且可在低峰时段降低收费标准。

拥挤道路使用收费从时间维和空间维上可以分为静态收费和动态收费两大类。静态拥挤收费主要以边际社会成本为拥挤定价的理论基础<sup>[5]</sup>, 静态收费模型不能分析车辆排队的消涨过程, 不能让出行者有提前或退后出发的自由, 不能分析不同时间价值的人们对收费政策的不同反应。动态拥挤收费的主要思想是通过公路网中发生拥挤的个别公路进行收费, 用不同时间不同收费费率来影响公路使用者的出发时间和路径选择方式, 使公路网上的交通流重新分布趋于均衡。这种策略主要是依据路网中道路通行能力和交通需求来确定收费费率。Vickrey 应用确定性排队理论, 首先在 1969 年提出了道路收费系统的动态模型-瓶颈模型, 这也是最早的动态拥挤收费的理论基础。

高速公路的建设还没形成网络, 主要承担中远距离的交通, 且其与并行的其他等级公路相比具有快速高效的竞争优势, 所以对高速公路实行可变收费考虑

网络约束因素较少, 主要目的是调整交通流在时间段上的分布, 高速公路可变收费属于动态收费。

## 2 高速公路可变收费标准的制定及出行者出行选择模型

### 2.1 高速公路可变收费影响因素分析

#### (1) 交通量

高速公路交通量的大小超过了高速公路的通行能力, 拥挤才会产生。高速公路的总交通量和交通量时段分布是可变收费标准制定的主要依据。

#### (2) 高速公路平行路段的条件

一般的高速公路都有一条或两条与之平行的道路, 平行道路的交通条件和交通量的大小也同样影响着高速公路可变收费标准的大小情况。

#### (3) 高速公路拥挤持续时间

目前高速公路拥挤基本发生在高峰小时, 其余的时间高速公路的交通量远远低于通行能力, 交通资源闲置。因此, 如果高速公路拥挤持续时间较长, 标准就要制定得相对较高, 以促使高速公路使用者在平峰出行。相反, 标准就制定得相对低一些。

#### (4) 高速公路使用者的属性

高速公路使用者的个人特性主要包括其个人收入、消费心理、职业、出行目的等, 它是影响高速公路不同时段收费标准制定的最基本原因。

#### (5) 车型

在国外, 高速公路可变收费标准的制定最主要的目的是要限制小运量的客运交通方式, 支持大运量的客运方式。根据我国高速公路的交通现状和车型划分, 影响交通特性影响较大的为货运交通, 尤其是大货车, 所以高速公路可变收费应重点促进大货车选择低峰或平峰时段运行。

#### (6) 经济发展速度

国际机动化经验表明, 当人均 GDP 达到 3 000 美元, 小汽车发展开始进入家庭; 当人均 GDP 超过 1 万美元, 小汽车将逐步普及。如果某个区域经济发展速度较快, 那么当前制定的高速公路可变收费标准会马上不适应新的交通需求增长的要求, 此时就需要相应的提高可变收费标准。

在以上影响因素中, 交通量和持续拥挤时间将影响到可变收费标准时段的划分和标准提高的程度; 并行路段情况将对实施可变收费后出行者的路线选择模型的建立和标定起关键作用; 不同车型的影响分析可确定实施可变收费重点针对的车型; 高速公路使用者的属性和经济水平将决定出行者的出行决策, 是出行

行为选择分析的基础。

## 2.2 可变收费方案设定

在对高速公路现行收费标准和交通流特征(总交通量、时段分布、速度、车型比例等)进行分析的基础上,设定初步的可变收费标准方案。

可变收费方案设定主要是指收费的时段划分,车型设定,及相应时段上收费的标准。

### (1) 时段划分

根据现状交通流状况,可将1d24h划分为几个时段,如高峰时段、次高峰时段、平峰时段和低峰时段。

### (2) 车型设定

主要设定高速公路交通组成中对交通运行性能影响较大的车型。在我国,因为大中型货车运行速度慢,占用道路面积大,对道路破坏严重,所以确定对大中型货车实施可变收费。

### (3) 相应时段收费标准

针对不同的时段划分,可设定以下几个标准确定方案:①只在高峰时段提高收费标准;②只在低峰时段降低收费标准;③在高峰时段提高收费标准,在次高峰和低峰时段降低收费标准,但所降程度不同,在平峰时段保持原标准。

可变收费方案设定后,要在进行问卷调查的基础上进行调整修改。

## 2.3 高峰拥挤时段收费标准的制定

设在高峰时段因为拥挤而额外增收的收费费率为 $P$ ,则它主要由两部分组成:

(1) 由于拥挤,增加单位交通量而引起的其它车辆运营成本的增加,用 $MC_1$ 表示。

(2) 由于拥挤,增加单位交通量造成时间延误而引起的货物在途时间的延长及效益的下降,用 $MC_2$ 表示。

$$P = MC_1 + MC_2 \quad (1)$$

由文献[9]可得 $C_1$ 的计算公式为

$$C_1 = 501.3328 - 12.3304v + 0.10198v^2 \quad (2)$$

对高速公路

$$V = 86.04 - Q/960 \quad (3)$$

式中, $V$ 为车速,km/h; $Q$ 为交通量,veh/h; $C_1$ 为车辆运营成本,元/( $10^6$ kg·km)。

由公式(2)得

$$MC_1 = -12.3304 \frac{dv}{dQ} + 0.20396v \frac{dv}{dQ} \quad (4)$$

由公式(3)得

$$\frac{dv}{dQ} = -\frac{1}{960} \quad (5)$$

$C_2$ 的计算公式为

$$C_2 = \alpha \frac{l}{v} \quad (6)$$

则

$$MC_2 = -\frac{\alpha}{v^2} \frac{dv}{dQ} \quad (7)$$

式中, $\alpha$ 为车内货物单位时间的价值; $l$ 为收费公路长度,km。

对货物运输 $\alpha$ 的计算公式如下

$$\alpha = \frac{P_h I E F}{16 \times 365} \quad (8)$$

式中, $P_h$ 为在途货物的平均价格,元/ $10^3$ kg; $I$ 为社会折现率; $E$ 为货车载重量, $10^3$ kg; $F$ 为货车实载率。

结合公式(1)、(4)、(5)、(7)、(8),得到高峰时段增加的费率 $P$ 的计算公式如下

$$P = 0.01284 + 0.0002 \left[ 86.04 - \frac{Q}{960} \right] + \frac{P_h I E F l}{960 \times 16 \times 365 \times \left[ 86.04 - \frac{Q}{960} \right]^2} \quad (9)$$

## 2.4 可变收费出行者出行选择模型

### 2.4.1 出行者出行选择模型

一切宏观的交通活动都产生于每个出行个体的出行决策。可变收费标准的实施,必然引起高速公路出行者决策行为的改变,从而达到交通流合理分配的目的。出行者出行行为选择包括时间改变、路线改变和出行方式改变。

在本项目研究依托的沪宁高速的车辆进行调研中,因为与其并行的312国道正在改建,调查结果显示改变出行方式和出行路线所占的比例非常小,主要为改变出行时间,所以本文对出行者的出行时间选择模型进行探讨。

在可变收费环境下,出行个人对出行时间的选择有两种:因为高峰期(低峰期)的涨(降)价而改变自己的出行时间;或者保持原有的出行时间不变(如图2所示)。这是一个典型的离散2元选择问题,因此我们将针对其建立2元选择模型(Binary Logit Model)。

此2元选择模型的选择集合(Choice Set)只有两个值:1和0。1代表出行个体改变了出行时间;0则表示他没有改变。

此模型可以描述为

$$p_n = \Pr(U_{1n} \geq U_{0n}) = \frac{e^{U_{1n}}}{e^{U_{1n}} + e^{U_{0n}}} \quad (10)$$

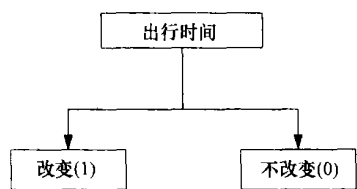


图 2 出行时间 2 元选择模型

其中: $p_n$  为第  $n$  类人改变其出行时间的概率;  $U_{1n}$  为第  $n$  类人改变其出行时间的效用函数;  $U_{0n}$  为第  $n$  类人不改变其出行时间的效用函数。

时间选择模型产生一个出行者在价格按高峰/ 低峰时段调整之后, 其出行时间改变的的概率。它可以用来预测在可变收费环境下, 相同类型的出行者改变其出行时间的比例。一旦确定这个比例, 就可以得到实施可变收费之后高峰期交通流量分布。

2.4.2 模型的标定方法

(1) 调查问卷的设计

可变收费问卷设计主要考虑与可变收费相关的影响因素的反映, 从而可以利用得到的数据进行建模分析。通过对以上影响可变收费主要因素以及将要建立模型, 调查问卷应该重点反映出出行者是否有能力改变出发时间和经济收入水平两个因素, 这两个因素的反映包括以下调查内容: 出行者的经济收入水平; 出发地、出口; 出行者月出行该高速公路次数; 车辆属性; 出行目的。

另外, 调查问卷还应反映: 出行者可接受的收费标准调整幅度; 并行路段出行者对该高速公路实施可变收费后的反应; 出行者对设定的可变收费标准所做出的改变时间、路线或出行方式的宏观反应。

我们在沪宁高速高峰时段发放了 700 份大中型货车的调查问卷, 分析其中 600 份有效调查问卷, 根据与可变收费影响较大的出行时间是否机动和经济因素将被调查者整理分类如表 1。

表 1 可变收费调查问卷调查者分类表

| 被调查者分类                      | 比例 % |
|-----------------------------|------|
| 出行时间机动、家庭收入低于 5 万元 (第 1 类)  | 27   |
| 出行时间机动、家庭收入高于 5 万元 (第 2 类)  | 18   |
| 出行时间不机动、家庭收入低于 5 万元 (第 3 类) | 40   |
| 出行时间不机动、家庭收入高于 5 万元 (第 4 类) | 15   |

(2) 自变量的确定及效用函数的标定方法

在出行时间选择模型中, 第  $n$  类人不改变其出行时间的效用函数  $U_{0n}$  为 0, 第  $n$  类人改变其出行时间的效用函数  $U_{1n}$ , 与出行者改变出行时间相关的因素主要为出行者出行时间是否机动及出行者的经济条

件, 分别设为  $x$  和  $y$ 。则  $U_{1n}$  为以  $x$  和  $y$  为自变量的线性方程

$$U_{1n} = a + bx + cy \tag{11}$$

在调查结果中, 如出行者改变原出行时间, 则  $U_{1n}$  为 1, 否则为 0; 如出行者出行时间较为机动, 则  $y$  为 1, 否则为 0; 如出行者家庭年收入超过 5 万元, 则为 1, 否则为 0。根据调查问卷结果, 可对该方程进行回归, 得到系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为 0.16、0.65、- 0.22, 所以出行者出行时间选择模型的效用函数为

$$U_{1n} = 0.16 + 0.65x - 0.22y \tag{12}$$

各类大中型货车司机改变出行时间的概率为  $P_1 = 0.69, P_2 = 0.64, P_3 = 0.54, P_4 = 0.48$

根据各类司机所占比例, 高峰时段大中型货车改变出行时间的概率为

$$P = 0.69 \times 27\% + 0.64 \times 18\% + 0.54 \times 40\% + 0.48 \times 15\% = 0.59$$

3 可变收费方案的评价

3.1 评价指标

实行可变收费标准的主要目的是促进交通流的合理分配, 充分利用道路资源, 减少交通拥挤。在对可变收费对出行者出行行为选择进行影响分析的基础上, 来对可变收费实施后的效果进行评价, 评价指标主要包括以下几个方面:

(1) 通行能力和服务水平

在高速公路基本路段, 大型车的混入率是影响实际通行能力的一个重要因素。可变收费方案实施后, 大型车在时间段和空间上得到合理分布, 从而高峰期的混入率降低, 提高实际通行能力, 服务水平提高, 所以高速公路的通行能力和服务水平是评价可变收费标准的重要指标。通行能力的提高通过各时段大中型货车比例变化而引起的大型车修正系数 $f_{HV}^{[12]}$ 的变化来反映。

(2) 交通安全性

实行可变收费的一个主要目的和功能就是提高高速公路车辆运行的安全性。不同类型车辆行驶性能的差异是造成高速公路交通事故的一个重要原因。可变收费的实施, 使各车型在各时段和空间段上得到合理分布, 从而使不同车型间的性能差异减小, 从而交通安全性能提高。衡量交通安全性的常用指标包括事故次数、死亡数、万车事故率、万人事故率和亿车公里事故率等。但由于这些指标的获得需要时间周期较长, 所以通过对交通安全影响较大的交通流特征指标

来反映交通安全性, 这里主要包括交通量、车辆行驶速度和大中型货车比例等。

3.2 评价结果

实施可变收费后, 根据大中型货车改变出行时间的概率, 得高峰时段交通量变化如表 2 所示。

表 2 高峰时段交通量变化表

|           | 现状    | 可变收费实施后 |
|-----------|-------|---------|
| 中大型货车/ 辆  | 1449  | 594     |
| 总交通量/ 辆   | 7060  | 6205    |
| 中大型货车比例 % | 20. 5 | 9. 6    |

高速公路交通量在高峰、次高峰时段比较拥挤, 实施可变收费后大型车数量的减少使得 $f_{HV}$ 增加, 大型车对通行能力的折减系数提高, 有利于实际通行能力的提高。例如目前沪宁高速小型车约占 80%, 大型车 (包括中型及重型载货汽车、拖挂车) 约占 20%, 取各车型折减系数分别为 1. 0、2. 0<sup>[12]</sup>, 则大型车修正系数 $f_{HV}$ 为 0. 83。实行可变收费以后拥挤时段大中型车的比例将下降, 小型车约占 90%, 大中型车约占 10%, 计算出大型车修正系数 $f_{HV}$ 为 0. 91, 高速公路得实际通行能力的提高。

研究表明<sup>[12]</sup>, 交通安全性与道路上行驶的各种车辆行驶速度的离散程度成反比, 即车速太慢或太快均易产生事故, 而顺应交通流的速度则是安全的。高速公路拥挤时段车辆大量聚积收费站附近, 车速偏低, 而经过长时间的排队以后, 从心理学的角度分析, 司机很容易开快车, 这均不利于行驶安全。可变收费实施以后, 随着拥挤时段拥挤程度的变小, 车辆的减速和加速的机会将减少, 安全性能得到提高。

如沪宁高速高峰时段目前客车交通量约占 80%, 载货车约占 20%。实行可变收费以后, 载货车下降到总交通量的 10%, 则客车交通量就占 90%。设客车平均速度为 90km/h, 载货车平均速度为 70km/h。可以计算出原先速度方差为 6km/h, 而实施可变收费后速度方差变为 5. 4km/h, 交通运行安全性提高。

4 结论

本文分析了影响可变收费的主要因素, 提出了可变收费标准的设定方法和出行者行为选择模型及其标定方法, 可变收费方案的评价指标和结果, 从而可循

环优化可变收费标准。

可变收费是一种有效的交通需求管理方法, 为在实际中得到切实应用, 还应做好以下方面的工作和研究:

- (1) 与可变收费标准相应的电子自动收费技术 ETC 的配套使用。
- (2) 政府政策的支持引导, 对广大群众的宣传教育, 使群众理解可变收费的重要意义是可变收费措施应用实施的基础和关键。

参考文献:

[ 1 ] May A D, Bonsall P W, Hills P J. The Impacts of Different Road User Charging Systems In: Proceedings of the Transportation Into The Next Millennium [ C ] . Singapore: Nanyang Technological University, 1998.

[ 2 ] S Shmanske A Simulation of Price Discriminating Tolls [ J ] . Journal of Transport Economics and Policy, 1993, 27: 225- 235.

[ 3 ] K A Small, J A Gomez-Ibanez Road Pricing for Congestion Management: The Transition from Theory to Policy [ C ] . Cheltenham, UK: Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility K. J. Button and E. T. Verhoef, Eds., Edward Elgar, 1998.

[ 4 ] E Sullivan. Evaluating the Impacts of the SR 91 Variable-Toll Express Lane Facility: Final Report [ R ] . San Luis Obispo, CA: Report to California Department of Transportation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Cal Poly State University, 1998.

[ 5 ] Yang H, Huang H J. Principle of Marginal-cost Pricing: How does it Work in a General Road Network [ J ] . Transportation Research A, 1998, 32 ( 1): 45- 54

[ 6 ] 吴子啸, 黄海军. 瓶颈道路使用收费的理论及模型 [ J ] . 系统工程理论与实践, 2000 ( 1) .

[ 7 ] 史峰, 等. 拥挤道路使用收费的理论构架 [ J ] . 交通运输工程学报, 2002 ( 2) .

[ 8 ] 李枫, 沈嘉栋. 城市交通拥挤收费的经济学分析 [ J ] . 上海铁道大学学报, 1999 ( 2) .

[ 9 ] 安旗林, 殷作超. 公路建设项目可行性研究报告指南 [ M ] . 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.

[ 10 ] Mark w Burris, Ram M Pendyala Discrete Choice Models of Traveler Participation in Differential Time of Day Pricing Programs [ J ] . Transportation Policy, 2002 ( 9): 241- 251.

[ 11 ] 袁剑波, 张起森. 公路收费标准优化及收费在交通管理中的应用研究 [ J ] . 中国公路学报, 2002 ( 1) .

[ 12 ] 王炜, 过秀成. 交通工程学 [ M ] . 东南大学出版社, 2000.