

基于效益-费用的高速公路货车差异化收费 双层优化建模

张惠玲^{1,2}, 王靖帆¹, 曹一铄^{1,3}, 敖谷昌^{1,2}

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 智能综合立体交通重庆市重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆长安民生物流股份有限公司, 重庆 401120)

摘 要:通过分析高速公路的经营支出和货车驾驶员的出行选择意愿,推导不同路径的车流量,并构建了收费情况下的不同路段的行程费用函数。该模型为双层优化模型,上层规划以实现网络用户盈余最大为目标,并将道路经营企业的财务指标作为约束条件;下层规划选用弹性需求下的用户均衡模型描述道路使用者的出行选择行为。通过遗传模拟退火算法对模型进行求解。最后,通过具体案例验证优化方案可以使高速公路的货车流量提升约 20.67%,收费收入提升 5.88%,货车通行费减免 13.56 万元/d,表明本文货车差异化优化收费方案在实际中具有一定的应用效果。

关键词:高速公路;差异化收费;双层优化模型;遗传模拟退火算法;用户均衡模型

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)07-1958-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241380

Two-layer optimization modelling on expressway differentiated tolling for trucks based on benefit-cost

ZHANG Hui-ling^{1,2}, WANG Jing-fan¹, CAO Yi-shuo^{1,3}, AO Gu-chang^{1,2}

(1. College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Intelligent Integrated and Multidimensional Transportation System, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Changan Minsheng APLL Logistics Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The different routes traffic flow was calculated and the travel cost function of the expressway was established through analyzing the operation expenditure of expressway and the travel choice willingness of truck drivers. The function is a two-level optimization model, and the upper layer planning selects the idea of road network managers pursuing maximizing the surplus of the network users and takes the financial indexes of the road operating enterprises as the constraints condition, the lower layer planning chooses the user equilibrium model under elastic demand to describe the travel choice behavior of road users. The genetic simulated annealing algorithm was used to solve the model. Finally, using the example verifies that

收稿日期: 2024-12-31.

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0786); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202404301).

作者简介: 张惠玲(1980-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 交通信息工程及控制. E-mail: huilingz@126.com

通信作者: 敖谷昌(1975-)男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通运输规划与管理. E-mail: agc2002@163.com

the optimization scheme proposed by the thesis can improve the truck flow of the highway by 20.67%, and the toll revenue is improved by 5.88%, and the truck toll fee is reduced by 135 600 yuan/day. It shows that the differentiated optimization of truck charging scheme researched in the thesis has a good application effect in practical implementation.

Key words: expressway; differential toll; two-layer optimization model; genetic simulated annealing algorithm; user equilibrium model

0 引言

目前,我国高速公路货运逐步过渡到现阶段“互联网+物流”的货运数字化变革期。作为对运输成本、时间价值最为敏感的货车驾驶员,通常会根据其个体差异性选择自身效益最优的出行路径,进而造成高速公路资源闲置严重,区域路网整体通行效益不高,经营企业也因车流量低于预测值而出现收益不足的风险。2019年3月,国家发改委颁布《关于推动物流高质量发展促进形成强大国内市场的意见》^[1]指出,各省份因地制宜制定适合自身区域特点的差异化收费模式。2021年6月,交通运输部印发《全面推广高速公路差异化收费实施方案》^[2],提出科学精准制定差异化收费方案,全面推广差异化收费,走绿色可持续发展之路。

针对高速公路收费方案研究,国外主要基于经济补偿理论、级差效益等经济学相关定价理论对高速公路收费标准进行制定^[3],也有相关学者提出了基于需求价格弹性的费率制定方法^[4]。唐俊忠等^[5]分析了多因素作用下高速公路货车收费标准变化的弹性水平。不少学者结合收费标准制定影响因素,通过对高速公路经营企业相关成本支出进行分析,实现了对高速公路收费标准的制定^[6,7]。Laval等^[8]以获取企业最大利润为目标,比较了两种动态定价方案的交通分配、收入和总延误。Li等^[9]以个人收入水平为基准对区域内道路使用者进行类别划分,分析了不同类别出行者对道路通行费率的敏感性。Maffii等^[10]基于边际成本定价法测算了高速公路收费标准,并对其融资能力进行评估。裴莉莉等^[11]针对高速公路收费数据中的异常检测和修复问题,对高速公路差异化收费方案进行了改进。黄亚飞等^[12]测算了不同收费收入目标下的道路最优通行费率。另外,针对近几年的差异化收费,孔德学^[13]结合出行者个体差异性将驾驶员进行划分,研究了不同类别货车驾驶员面对费率调整时的出行选择行

为。肖清榆等^[14]对收费公路以及非收费公路进行交叉弹性分析,研究了早晚优惠费率组合下的差异化收费对货车出行选择的影响。王林等^[15]提出了一种分车型分路段的组合差异化收费方案。也有学者考虑环境因素进行相关研究,李昊等^[16]等提出高速公路经营企业可以将车辆排放污染物的环境治理成本纳入经营成本以作考虑。王江锋等^[17]以碳排放收益最大化和物流企业成本最小化为目标,分析了货车差异化收费的定价模型。

综上所述,现有研究关于高速公路通行费率的制定基本形成了较为成熟、完善的理论体系。但考虑到高速公路收费标准的制定涉及政府管理部门、高速公路经营企业以及道路使用者三方利益,而目前高速公路收费标准的制定大多基于高速公路经营企业角度,以成本控制为导向,结合路网周边流量信息,以实现高速公路经营企业经济效益最优为目标制定收费标准,较少从其他利益方角度考虑,通常忽视了社会效益以及路网整体通行效率。

本文在对高速公路货车驾驶员的出行特征进行调查分析的基础上,构建双层规划模型对目标高速公路货车通行费率进行优化,在保证高速公路企业经营成本尽可能不受损失的前提下实现区域网络用户盈余最大,提升路网整体通行效益,提出适用于目标高速全路段货车的差异化收费策略;并基于所求解出的最优通行费率及路段分配流量,根据现行路网交通流时空分布特征,结合行为学以及交通运输经济学相关理论,提出高速公路货车分时段差异化收费策略,为高速公路管理者关于通行费率的调整提供参考。

1 高速公路运行特征分析

1.1 高速公路经营支出测算

作为交通基础投资设施,高速公路资金收支缺口较大。为平衡路网流量与运营公司间关系,保障经营者的合理利益与积极性,高速公路收费

费率常常根据项目投资数额、运营养护成本、预测交通流量、经营年限等因素综合计算确定,进而满足还贷要求及维持道路运营目标的需要。在此过程中,虽然环境治理成本对短期收费标准的影响较小,但环境治理成本的加入有助于提高不同类型高速公路选用差异化收费标准的外部因素敏感性,且它在高速公路的长期运营,尤其是考虑到绿色发展和环保政策背景以及目前碳排放控制等环境方面引起的关注热度下,依然具有一定的重要性。因此,在此综合选用道路建设成本、环境治理成本以及相关养护运营管理成本对目标高速公路经营成本支出进行分析。高速公路的收费年限根据公路的类型有所不同,2004年颁布的《收费公路管理条例》^[18]规定,国家确定的中西部落、自治区、直辖市的经营性公路收费期限,最长不得超过30年。本文将该年限作为收费政策的时间上限。

(1) 建设成本

建设成本,即高速公路建设时所花费的材料消耗、人员工资等相关费用。参考相关研究成果^[19],高速公路建造成本为:

$$I_l(C_{a\max}) = \Psi \sigma t_a^0 C_{a\max} \quad a \in A^* \quad (1)$$

式中: I_l 为高速公路建设成本,元/天; σ 为比例参数,常取值为 $\sigma = 2 \times 10^5$ 元/veh; $C_{a\max}$ 为路网中路段 a 的通行能力; t_a^0 为路网中路段 a 上的零流时间,h; Ψ 为单位时间的量纲转化系数,常根据项目实际情况进行调整修正; A^* 为参与高速公路建设成本计算的所有路段集合。

(2) 环境治理成本

在强调绿色规模经济发展的背景下,环境效益也受到了一定重视。本文参考相关研究成果^[10],针对不同车型流量、每公里环境治理成本和道路里程三因子与环境治理成本费用建立联系,高速公路环境治理成本为:

$$I_H = \sum_{g=1}^6 \Gamma_g x_{ag} r l_a \quad (2)$$

式中: I_H 为高速公路环境治理成本,元/天; Γ_g 为车型 g 相对于基准车型对交通流的影响系数; x_{ag} 为车型 g 在路段 a 上的流量; r 为每1km的环境治理成本因子,取值为0.04~0.08元/(veh·km)^[17]; l_a 为路网中路段 a 的通行里程,km。

(3) 运营管理成本

高速公路企业在经营管理过程中避免不了人工管理成本以及其他成本支出,其中,人工成本主

要涉及到工作人员基本工资、加班费、绩效奖金、通讯费以及五险一金等各类费用,其他成本涉及到行政费用支出和营业税及附加。本研究高速公路管理运营成本费用函数可表示为:

$$I_G = F(y, x) \quad (3)$$

式中: I_G 为高速公路的管理运营成本,元/年; x 为年份; F 为具体函数关系,常由相关高速公路实际经营数据拟合而来。

(4) 养护成本

高速公路养护成本主要涉及路面清理、桥梁涵洞维护费、护栏隔离网、机电系统运营维护等设施维修等。参考相关成果^[20],本文提出了一种高速公路养护维修费用模型,具体如式下所示:

$$I_Y = k_r \cdot k_c \cdot (3.873 + 0.386 \cdot X_1 + 1.965 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 + 6.157 \cdot X_3 - 2.639 \cdot X_4 - 2.576 \cdot X_5) \cdot (k_g/100)^{(X-X_0)} \quad (4)$$

式中: I_Y 为高速公路的养护成本,万元/(km·年); k_r 为包括机电系统在内的高速公路日常维修费用系数,常取值1.6~2.51; k_c 为车道修正系数; k_g 为固定资产投资价格指数; X 为预测养护年份; X_0 为高速公路养护的基准年; X_1 为高速公路通车年数; X_2 为高速公路交通量; X_3 为高速公路桥隧比; X_4 、 X_5 为路面类型虚拟变量。

故高速公路经营成本(REV)函数具体可表示为:

$$I = I_l + I_H + I_G + I_Y$$

1.2 货车驾驶员出行选择行为分析

为制定符合实际情况的高速公路货车差异化收费标准,保证实施效果,本文主要对有出行需求的货车驾驶员在未来高速公路货车差异化收费背景下关于路网中出行路径的选择意向进行分析。本章节拟采用可操作性更高、能灵活处理多种变量的SP出行意向调查方法,对路网中货车驾驶员出行路径选择偏好进行调查。考虑到货车驾驶员此类群体比较特殊,且货车的聚集地区往往以高速公路互通节点为中心,呈组团状聚集。因此,为了能更好地收集货车驾驶员群体的出行特征,考虑到货车在道路行驶过程中速度较快,出于调查人员生命安全考虑,本次调查地点以重庆合川沙溪片区与渝北区箭沱湾片区为中心展开,选取周边物流园区、加油站、货运场站以及批发市场等货车停放的地方展开调研。

由调查可以分析货车驾驶员出行路径选择时

关于道路通行费、行程时间、车辆营运费用以及舒适性4项影响指标的重视程度,结果如图1所示。

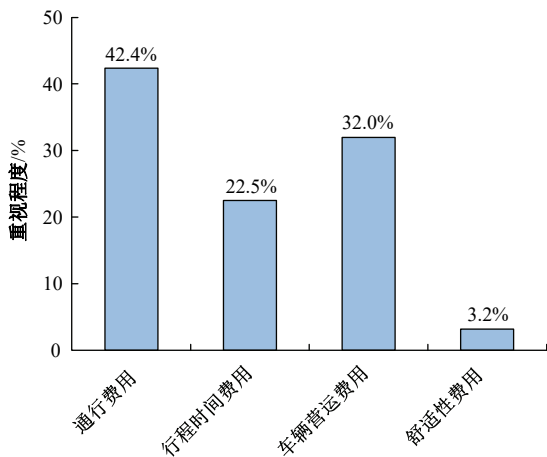


图1 选择重视因素比例分布

Fig. 1 Percentage of the travel selection factors

由图1可以发现,大多数货车驾驶员在路网中出行路径选择规划时,更偏向于所直接消耗的通行费用成本最少,如道路通行费以及车辆营运费用,其占比分别约为42.4%、32.0%;其次是道路行程时间;而舒适性费用,即本次行程结束后的驾驶员疲劳恢复休息时长,该指标通常与出行用户个体差异性有关,仅7人选择,占比仅有3.2%。据调查,这一小部分货车驾驶员大都收入水平较高且出行频率较高。

当通行费用降低不同比例时关于道路使用者的出行意愿进行统计,结果如图2所示。由图2可以发现,通常出行者都偏向于较大的折扣,当折扣程度较低为5%~10%之间时,选择高速公路

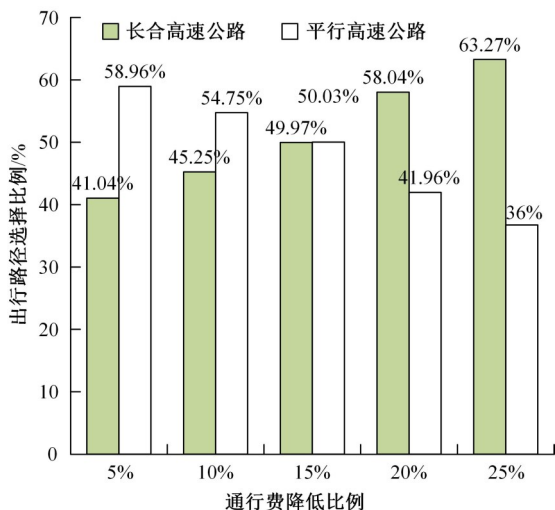


图2 通行费降低不同比例时驾驶员出行路径选择情况
Fig. 2 Driver's route selection condition for different highway toll discount

出行的货车驾驶员变化不大,整体变化幅度也在10%以内。而随着通行费用折扣程度的不断增加,选择高速公路的人数比例也逐渐递增,例如当对高速通行费用打7.5折时,此时高速公路通行费用与其路网内所平行的竞争道路较为接近,且该道路自由行驶度较高、道路整体通畅平顺、行程时间缩短的优势也导致超过6成的货车驾驶员开始倾向选用高速作为出行路径。

当通行费用降低分别降低5%、25%时,选择长合高速公路的出行意愿比例提升约为4.72%、26.95%,具体如图3所示。

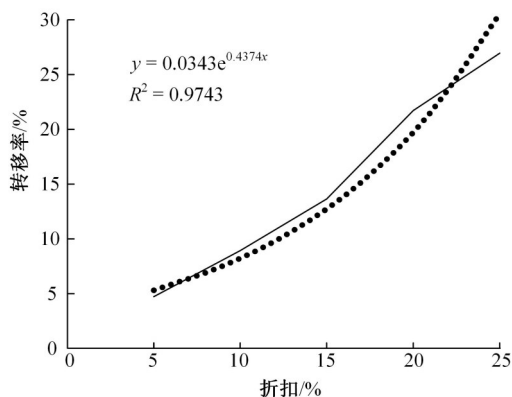


图3 通行费降低不同比例时长合高速转移率变化情况

Fig. 3 Traffic flow transfer for different highway toll discount

2 高速公路货车差异化收费双层优化建模

2.1 广义行程费用函数分析

本文将道路使用者出行阻抗定义为可以反映出行时间成本阻抗以及出行费用成本阻抗的函数。其中,各类车型驾驶员的出行时间成本阻抗可以利用BPR路阻函数确定,取决于路段的通行能力以及各路段分配的流量;出行费用成本阻抗主要由道路通行费以及车辆营运费用(燃油消耗、车辆折旧等)构成,并引入道路使用者的单位时间价值,将出行费用成本转化为时间成本。最后以各折算成本的加权和形式建立起使用者广义行程费用函数,具体如下所示:

$$t_{ag}(x_a, y_a) = \partial_1 t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_{a \max}} \right)^\beta \right] + \frac{\partial_2}{VOT} \times (y_{ag} l_a + \Lambda_{ag}) = \partial_1 t_a^1(x_a) + \frac{\partial_2}{VOT} (\zeta_{ag} y_a l_a + \Lambda_{ag}) \quad (5)$$

式中: $t_{ag}(x_a, y_a)$ 为路网中路段 a 上车型 g 的广义行程费用函数; t_a^0 为路网中路段 a 上的零流时间, h; α, β 为目标道路相关系数, 常用值一般取 $\alpha = 0.15, \beta = 0.4$, 也可以根据道路实际情况进行标定; $C_{a\max}$ 为路网中路段 a 的通行能力; y_{ag} 为路网中路段 a 上车型 g 的通行费率, 元/(veh·km); Δ_{ag} 为路网中路段 a 上车型 g 的营运成本, 元; y_a 为路网中路段 a 上的通行费率, 元/(veh·km); ζ_{ag} 为不同车型 g 之间的收费级差系数; ∂_1, ∂_2 分别为道路使用者出行时间价值成本、经济价值成本的权重系数, 具体取值根据路段实际情况标定; VOT 为道路使用者的单位时间价值, 元/(veh·h)。

关于车辆营运成本 Δ_{ag} , 本文主要针对燃油车辆的营运成本进行分析, 其他类型车辆在研究对象中所占比例较低, 可忽略不计。

不同车型 g 的燃油成本计算公式为:

$$\Delta_{ag} = g_{ag} f_i = \left[\left((a_g v_a^2 + b_g v_a + c_g) e \tau_1^{\nu} \tau_2^{\sigma} \right) \frac{l_a}{100} \right] f_i \quad (6)$$

式中: g_{ag} 为出行路段 a 上车型 g 的油耗因子, L/(100 km); v_a 为出行路段 a 上车型 g 平均行驶速度, km/h; σ 为路段坡度, %; f_i 为车辆燃油价格, 元/L; $a_g \sim e_g$ 为车型 g 的模型回归参数; e, τ_1, τ_2 为回归系数, 具体如表 1 所示。

表 1 高速公路燃油消耗模型参数系数表

Table 1 Fuel consumption parameter coefficient in the highway

车型	a	b	c	e	τ_1	τ_2
一类货车	0.002 7	-0.309 0	21.066 7	0.922 5	1.001 0	1.103 4
二类货车	0.005 7	-0.763 4	47.190 0	1.088 6	0.999 1	1.263 8
三类货车	0.022 4	-2.997 1	125.931 3	0.499 1	1.010 4	1.222 9
四类货车	0.014 0	-1.765 7	86.405 7	0.908 4	1.000 7	1.148 4
五类货车	0.013 7	-2.180 0	108.328 6	0.719 3	1.004 1	1.106 8
六类货车	0.014 6	-2.075 0	92.865 6	1.334 3	0.997 5	1.137 1

关于用户时间价值, 不同地区由于经济发展水平存在一定差异, 出行者的个人出行时间价值通常也不同。本文以出行用户所在区域的平均收入计算出行者本次的出行时间价值, 具体为:

$$VOT = (GDP / (t_w \times d)) \cdot \alpha \cdot \beta \quad (7)$$

式中: GDP 为目标区域内出行用户的人均生产总值, 元/人/年; t_w 为用户的出行时长, h; d 为用户的年均工作日, d; α 为时间价值系数, 道路使用者上下班出行常取值 0.5, 业务出行取值 1, 其余可

取值 0.25; β 为时间机会费用调节系数, 考虑到道路使用者的机会成本通常不能全部实现, 需要进行修正, 常取值 0.5。

2.2 道路流量函数测算

为分析驾驶员选择时的道路阻抗, 考虑到 logit 模型是通过效用函数进行推导, 本文利用“感知阻抗”代替目标效用函数, 其表达式为:

$$C_{k,g,rs} = c_{k,g,rs} - \frac{1}{\theta} \zeta_{k,g,rs}, \quad \forall k, r, s, g \quad (8)$$

$$c_{k,g,rs} = \sum_A t_{ag} \delta_{a,k}^{rs} \quad (9)$$

式中: $C_{k,g,rs}$ 为路网中 r 到 s 之间不同车型 g 对路径 k 上出行费用的理解值, 即感知阻抗; $c_{k,g,rs}$ 为路网中 r 到 s 之间车型 g 在第 k 条路径上的出行阻抗; t_{ag} 为路网中路段 a 上车型 g 的出行费用; $\delta_{a,k}^{rs}$ 为 0、1 变量, 若路段 a 在路网中 r 到 s 之间的路径 k 上, 则其值取 1; θ 为一个非负的比例参数, 可以将出行阻抗转换为效用函数; $\zeta_{k,g,rs}$ 为误差估计项, 服从 (0, 1) 的 Gumbel 分布, 其分布、密度函数分别如式 (10)(11) 所示。

$$F_{\zeta_{k,g,rs}}(x) = P(\zeta_{k,g,rs} \leq x) = \exp(-a \exp(-x)) \quad (10)$$

$$f_{\zeta_{k,g,rs}}(x) = a \exp(-x - a \exp(-x)) \quad (11)$$

式中: $a > 0; x \in (-\infty, +\infty)$ 。

根据离散选择理论, 对路网中不同车型道路使用者关于出行路径选择概率进行推导可得:

$$P_{\zeta_{k,g,rs}} = \Pr(c_{k,g,rs} \leq c_{l,g,rs}; \forall k \neq l, \forall g)$$

$$\Pr(c_{k,g,rs} - \frac{1}{\theta} \zeta_{k,g,rs} \leq c_{l,g,rs} - \frac{1}{\theta} \zeta_{l,g,rs}; \forall k \neq l, \forall g) =$$

$$\Pr(\zeta_{k,g,rs} \leq \theta(c_{l,g,rs} - c_{k,g,rs}) + \zeta_{l,g,rs}; \forall k \neq l, \forall g) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_{\zeta_{k,g,rs}}(y) \prod_{k \neq l} F_{\zeta_{l,g,rs}}[\theta(c_{l,g,rs} - c_{k,g,rs}) + y] dy =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} a e^{-y - a \exp(-y)} \prod_{k \neq l} e^{-a \exp[\theta(c_{l,g,rs} - c_{k,g,rs}) - y]} dy =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} a e^{-y} e^{-a \exp(-y) \sum_{k \in K_n} \exp[\theta(c_{k,g,rs} - c_{l,g,rs})]} dy =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-a \exp(-y) \sum_{k \in K_n} \exp[\theta(c_{k,g,rs} - c_{l,g,rs})]} d(-a e^{-y}) =$$

$$\frac{e^{-a \exp(-y) \sum_{k \in K_n} \exp[\theta(c_{k,g,rs} - c_{l,g,rs})]}}{\sum_{l \in K_n} \exp[\theta(c_{k,g,rs} - c_{l,g,rs})]} \Big|_{-\infty}^{+\infty} =$$

$$\frac{1}{\sum_{l \in K_n} \exp[\theta(c_{k,g,rs} - c_{l,g,rs})]} = \frac{\exp(-\theta c_{k,g,rs})}{\sum_{l \in K_n} \exp(-\theta c_{l,g,rs})} \quad (12)$$

当区域路网内各路径流量符合随机用户平衡时,路网中 r 到 s 之间关于车型 g 在第 k 条路径上的车流量 $f_{k,g,rs}$ 可以表示为:

$$f_{k,g,rs} = q_{rs,g} \cdot \frac{\exp(-\theta c_{k,g,rs})}{\sum_{l \in K_{rs}} \exp(-\theta c_{l,g,rs})} \quad (13)$$

$\forall k, r, s, g$

2.3 出行需求量与出行费用关系模型分析

公路网中某条收费道路通行费率的高低是影响货车驾驶员选择出行路径的重要因素之一。在进行费率制定时考虑交通需求的弹性变化更符合实际情况。通常道路使用者对某一出行路径阻抗进行估计时,也会考虑同一路径上其他车型用户对自身的影响,则令 $S_{g,rs}(c_{g,rs})$ 为车型 g 对高速公路网中 r 到 s 之间的最小期望出行费用函数,则:

$$S_{g,rs}(c_{g,rs}) = E \left[\min_{k \in K_{rs}} c_{k,g,rs} \right] = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta c_{k,g,rs}), \quad \forall r, s, g \quad (14)$$

此时,高速公路网中 r 到 s 之间关于车型 g 的交通出行需求量函数与出行费用间关系可以描述为^[19]:

$$q_{rs,g} = D_{rs,g}(S_{g,rs}(c_{g,rs})) = \hat{q}_{rs,g} \exp(-P \cdot S_{g,rs}(c_{g,rs})), \quad \forall r, s, g \quad (15)$$

$$c_{g,rs} = \min_{k \in K_{rs}} c_{k,g,rs} \quad (16)$$

式中: $\hat{q}_{rs,g}$ 为路网中 r 到 s 之间车型 g 的潜在交通需求; $D_{rs,g}(c_{g,rs})$ 为路网中 r 到 s 之间车型 g 的出行需求量函数; P 为交通需求对最小广义出行费用的灵敏度参数 $P = 24d^{-1}$; $c_{g,rs}$ 为路网中 r 到 s 之间车型 g 的出行阻抗。

2.4 考虑出行费用的多车型用户均衡模型

路网中存在多个OD对 w ,起点为 r ,终点为 s ,OD对集合 W ;路网中 r 到 s 之间关于车型 g 的交通需求量为 $q_{rs,g}$; a 为路段, A 为OD对间的路段集合; k 为路径, K 为OD对间的路径集合。其中,路段 a 的出行费用阻抗 t_a 是路段流量 x_a 的单调递增、连续可导的函数, $f_{k,g,rs}$ 为路网中 r 到 s 之间不同车型在路径 k 上的车流量。将路网中不同车型的OD需求量 $q_{rs,g}$ 以及不同出行路径上的流量 $f_{k,g,rs}$ 视为直接变量,则弹性需求下的多车型随机用户均衡模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min_{x,q} f(x,q) = & \frac{1}{\theta} \left\{ \sum_{rs \in RS} \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{g \in G} \Gamma_g f_{k,g,rs} (\ln f_{k,g,rs} - 1) - \right. \\ & \left. \sum_{rs \in RS} \sum_{g \in G} \Gamma_g q_{rs,g} (\ln q_{rs,g} - 1) \right\} + \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a^1(w) dw + \\ & \sum_{a \in A} \sum_{g \in G} \frac{1}{VOT} \cdot \Gamma_g x_{ag} (\zeta_{ag} y_a l_a + \Lambda_{ag}) - \\ & \sum_{rs} \sum_{g \in G} \Gamma_g \int_0^{q_{rs,g}} D_{rs,g}^{-1}(w) dw \end{aligned} \quad (17)$$

s.t

$$\sum_{k \in K} f_{k,g,rs} = q_{rs,g}, \quad \forall r, s, g \quad (18)$$

$$f_{k,g,rs} \geq 0, \quad q_{rs,g} \geq 0, \quad \forall k, r, s, g \quad (19)$$

$$x_{ag} = \sum_{rs} \sum_k f_{k,g,rs} \delta_{a,k}^r, \quad \forall a, g \quad (20)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k \sum_g \Gamma_g f_{k,g,rs} \delta_{a,k}^r, \quad \forall a, g \quad (21)$$

式中: θ 为一个非负的校正参数; $D_{rs,g}^{-1}(w)$ 为出行需求量函数的反函数; Γ_g 为车型 g 相对于基准车型对交通流的影响系数,为0、1变量,若路段 a 在路网中 r 到 s 之间的路径 k 上,则其值取1。

2.5 差异化双层优化建模

考虑到高速公路路网管理者(政府)在制定收费政策时既要保证满足高速公路经营企业财务目标及投资约束,也需根据道路使用者的反映做出最优规划和收费费率调节等决策,而双层规划模型能够优化和解决具备两层递阶结构的系统优化问题,在此类模型中的上下层决策者分别有着各自所期望的目标函数及约束条件,常表现为下层子系统通过上层目标函数所确定的有关决策变量作为参量,然后将在目标层约束条件下的可行范围内所求出的最优值进一步反馈到上层,经过多次循环,进一步求出在可行范围内该模型的综合最优解。因此,高速公路收费双层优化模型一般可以表示为:

$$\begin{cases} \min_y F(y, x(y)) \\ \text{s.t. } G(y, x(y)) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \min_x f(y, x) \\ \text{s.t. } g(y, x) \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: y 为上层决策者的决策变量; $x(y)$ 为下层决策者的决策变量,也称反映函数,变量 y 在上下两层目标函数之间传递; G 、 g 分别为上、下层决策变

量的约束集。

为更好地对目标高速通行费率进行测算,实现更准确的流量分配预测。本文上层规划描述路网管理者追求社会效益最大化的思想,选用网络用户盈余(用户效益与社会成本间的差额)最大作为上层决策目标^[21],并将高速公路经营企业相关道路建设成本、环境治理成本和营运管理成本等支出作为约束条件,保证经营企业的财务效益,避免亏损;下层模型中,考虑到出行路径的选择往往受行驶时间、通行费、燃油消耗等出行阻抗的影响,是一个多类别多准则的决策过程,因此,下层模型选用弹性需求下的多车型随机用户均衡模型弹性需求下的随机用户均衡模型,来描述货车驾驶员出行选择行为,通过求解来获取路网中目标路段货车的通行费率以及相应的流量。

综上所述,上层目标函数选用区域网络用户盈余作为表达形式:

$$\max_y f(y, q(y)) = \sum_{rs} \sum_{g \in G} \Gamma_g \int_0^{q_{rs,g}} D_{rs,g}^{-1}(w) dw - \sum_{rs} \sum_{g \in G} \Gamma_g c_{g,rs} q_{rs,g} \quad (24)$$

$$\text{s.t.} \quad y_a^{\min} < y_a < y_a^{\max}, \forall a \in A^* \quad (25)$$

$$\sum_{a \in A^*} \sum_{g \in G} \zeta_{ag} y_a l_a x_{ag} \geq REV \quad (26)$$

下层目标函数可以表示为:

$$\min_{x,q} f(x,q) = \frac{1}{\theta} \left\{ \sum_{rs} \sum_{k \in K} \sum_{g \in G} \Gamma_g f_{k,g,rs} (\ln f_{k,g,rs} - 1) - \sum_{rs \in RS} \sum_{g \in G} \Gamma_g q_{rs,g} (\ln q_{rs,g} - 1) \right\} \partial_1 \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a^1(w) dw + \partial_2 \sum_{a \in A} \sum_{g \in G} \frac{1}{VOT} \cdot \Gamma_g x_{ag} (\zeta_{ag} y_a l_a + \Lambda_{ag}) - \sum_{rs} \sum_{g \in G} \Gamma_g \int_0^{q_{rs,g}} D_{rs,g}^{-1}(w) dw \quad (27)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} f_{k,g,rs} = q_{rs,g}, \forall r, s, g \quad (28)$$

$$f_{k,g,rs} \geq 0, q_{rs,g} \geq 0, \forall k, r, s, g \quad (29)$$

$$x_{ag} = \sum_{rs} \sum_k f_{k,g,rs} \delta_{a,k}^{rs}, \forall a, g \quad (30)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k \sum_g \Gamma_g f_{k,g,rs} \delta_{a,k}^{rs}, \forall a, g \quad (31)$$

式中: A 为公路网中所有收费高速公路路段集合; A^* 为公路网中费率未知待优化高速公路路段的集合; G 为公路网中各类货车车型集合; K 为公路

网中 r 到 s 之间所有路径的集合; REV 为目标高速公路企业经营财务指标。

关于高速公路通行费率 y_a 限制范围的确定如下:对于费率待优化的目标高速公路,其通行费率上下限 $y_a^{\max}$ 、 $y_a^{\min}$ 可借鉴参考国内已实行差异化收费的高速公路折扣区间进行取值;当 $a \in A - A^*$, 通行费率 y_a 根据道路实际情况取值,此时路段流量可以通过求解式(31)得到。

2.6 模型求解

考虑到此类离散网络设计的双层规划问题属于典型的 NP-hard 问题,且下层模型有关非线性约束条件的存在易导致出现局部最优解。因此,本章节选用遗传-模拟退火混合算法(GASA 算法)对整体模型进行求解,下层模型选用相继平均法(Method of successive averages, MSA)进行求解。针对前文所提出的高速公路货车费率优化的双层规划模型,具体计算求解步骤如下所示。

2.6.1 遗传模拟退火算法解决步骤

步骤1 初始化

(1)关于遗传算法。首先确定其单点交叉概率 P_c 以及单点变异概率 P_m , 确定每一代随机产生的种群中的 N 条初始染色体,即最大种群数 N , 并确定其最大进化代数 M , 置进化代数 $\text{gen} = 0$;

(2)关于模拟退火算法。首先确定其内循环次数 K , 以及有关初始温度值 T_0 , 并令 $T = T_0$;

(3)针对上层决策问题中有关目标函数,确定合理、有效的适应度函数,并将上层规划问题的决策变量 u 进行编码,随机产生初代种群, $X(1) = (\dots, X_i(1), \dots)$; $i = 1, 2, \dots, N$; 置 $\text{gen} = 1$ 。

步骤2 将步骤1初始化所产生的 $X(\text{gen})$ 代入下层决策模型,进行货车流量分配计算,得到配流模式,并计算每一个个体 $X_i(\text{gen})$ 的适应度。若满足条件 $\text{gen} = \text{maxgen}$ 时,此刻适应度最大的染色体即为该高速公路货车费率优化的双层规划模型的全局最优解;否则,转步骤3继续循环。

步骤3 根据适应度分布复制种群 $X(\text{gen})$ 。

步骤4 根据交叉概率 P_c , 执行交叉操作。

步骤5 根据变异概率 P_m , 执行变异操作,令 $\text{gen} = \text{gen} + 1$, 从而得到新种群 $X_i(\text{gen})$, 并计算其个体的适应度。

步骤6 令 $i = 1$, 根据模拟退火算法对种群 $X_i(\text{gen})$ 进行操作处理,具体操作如下所示。

(1)当满足 $i = N$, 转向步骤7; 否则令循环轮

次计数 $k=1$,转至(2);

(2)利用状态产生函数产生个体 $X_i(\text{gen})$ 的新状态,对新个体进行解码后代入下层规划问题进行分配计算,得到上层规划的目标函数值,计算其适应度;

(3)采用Metropolis准则的邻域移动概率接受公式接受新个体;

(4)若 $k=M$,令 $i=i+1$,转步骤1;否则,令 $k=k+1$,转步骤2。

步骤7 退温操作,令 $T=0.5T$,转步骤2。

2.6.2 适应度函数的处理

关于决策模型中适应度函数的处理,其取值通常为一个非负的极大值。刘伟铭等^[22]在弹性需求下进行费率测算时将上层规划的目标函数转换为:

$$\bar{F} = -F + \rho P(\omega) \quad (32)$$

式中: ρ 为惩罚系数,常取一个大于0的整数。

定义惩罚函数:

$$\rho(\omega) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega \leq \epsilon \\ \omega^2, & \text{其他} \end{cases} \quad (33)$$

表2 区域路网内两条高速公路日均交通量统计表

Table 2 Traffic flow of the two ways in the area

高速公路名称	客车				货车(含专项作业车)						交通量/ (veh·d ⁻¹)
	一类	二类	三类	四类	一类	二类	三类	四类	五类	六类	
长合高速	7 034	145	200	73	363	764	229	899	90	1 615	11 412
平行竞争性高速	14 324	245	318	110	546	1 152	345	1 355	137	2 436	20 968

由表2可以发现,该区域通道内两条出行路径上的车型构成较为相似,高速公路客车交通量占比远高于货车交通量。其中,客车交通量以一类客车占比最大;货车交通量以二类、四类、六类货车为主,六类货车占比最大。

3.1 数据准备

(1)路网概括及模型相关参数的设置

关于车辆燃油消耗成本,根据重庆地区2022年1月17日0号柴油价格计7.14元/L,路段坡度取值2%,不同车型燃油消耗模型中的相关参数选取参照表1,高速公路行驶速度取其设计速度80 km/h。关于用户时间价值,时间价值系数 α 取值1,时间费用机会系数 β 取值0.5,按照2020年重庆市人均地区生产总值GDP取值80 027元人

$$\omega = \left| \sum_{a \in A} \sum_{g \in 1}^6 \zeta_{ag} y_a x_{ag} l_a - REV \right| \quad (34)$$

式中: REV 为企业实现财务指标时的收费收入,本文在此处取高速公路经营成本。

允许收费收入与经营成本之差在 $(-\epsilon, \epsilon)$ 范围内波动, ϵ 取0.000 5 REV 。所得到最终的适应度函数如下所示:

$$\text{Fitness} = \max - \bar{F} \quad (35)$$

3 案例分析

为了对论文研究的方案进行分析,选择重庆三环高速公路合川至长寿段进行方案验证。该路段全长76.062 km,双向四车道,设计速度为80 km/h。该高速公路的平行路径主要由合川至北碚的渝合高速与北碚至渝北的绕城高速公路东北段相互连接组成,里程约为80.83 km,各路段货车基准收费费率分别为0.54、0.4元/(veh·km)。其平行路径由于早期高速公路技术标准低、收费低导致交通量大,而近年新建的长合高速公路技术标准高、收费高导致交通量相对较小。该区域高速公路和平行公路的交通量及车辆情况如表2所示。

民币,高速公路货车驾驶员出行时间价值取值22.86元/(veh·h)。关于路阻函数,参考相关文献^[21],出行时间价值成本系数 θ_1 、经济价值成本系数 θ_2 分别取值0.35、0.65。校正系数 θ 取值为3。表3为区域路网中不同路径间各路段里程、通行费率、路段容量取值。为便于量化分析,将长合高速及其平行竞争高速所在合川、北碚和渝北区域路网简化为由3个节点、6条路段组成的路网,合川到北碚、北碚到合川、北碚到渝北、渝北到北碚、合川到渝北及渝北到合川6个方向对应路段编号分别为1~6。该区域高速公路网中,采取综合费率计价模式,以1型货车为基准车型,桥隧不单独计费,其他货车相对于基准车型对交通流的影响所得出的系数取值比例求解

表 3 各路段基本参数
Table 3 Road basic parameters

参数	路段编号					
	1	2	3	4	5	6
t_a^0/h	0.30	0.30	0.71	0.71	0.95	0.95
$y_a/[\text{元}\cdot(\text{veh}\cdot\text{km})^{-1}]$	0.54	0.54	0.40	0.40	—	—
l_a/km	23.90	23.90	56.93	56.93	76.06	76.06
$C_{a\max}/(\text{veh}\cdot\text{d}^{-1})$	25 000	25 000	30 000	30 000	30 000	30 000

为: $\Gamma_1:\Gamma_2:\Gamma_3:\Gamma_4:\Gamma_5:\Gamma_6=1.0:1.5:2:3:4:4$ 。不同货车车型之间的收费级差系数取值: $\zeta_1:\zeta_2:\zeta_3:\zeta_4:\zeta_5:\zeta_6=1.0:1.8:3.3:4.08:4.9:5.44$ 。

结合表 3, 当 $a \in A - A^*$ 时, 路段 1、2 和路段 3、4 上的关于一类货车基准通行费率 y_a 分别取值 0.58、0.40; 而当 $a \in A^*$ 时, 车辆在两条不同方向的路段上通行费率相同, 以 y_a 为求解变量。

区域高速公路网中各 OD 对间不同出行方向上的各类货车交通出行量以满足现行路网出行流量为准, 如表 4 所示。

表 4 路网中各 OD 对间交通出行需求量

Table 4 Traffic demand for OD pairs in the net

OD 对	起点-讫点	各车型交通出行需求/(veh·d ⁻¹)					
		一类	二类	三类	四类	五类	六类
1	合川-渝北	472	996	298	1 172	119	2 107
2	渝北-合川	436	919	275	1 081	110	1 945

(2) 收费费率界限确定

关于目标道路收费费率界限, 根据城市间高速公路网发展和不同约束条件下的投资规模, 长合高速采取了综合费率的收费方式, 该道路现行一类货车基准收费费率为 0.60 元/(veh·km), 结合目前国内差异化收费较多选取的 5%~25% 的折扣区间, 本文分别选以 5%、25% 的折扣幅度作为上下限, 即分别选以 0.57、0.45 元/(veh·km) 作为长合高速公路基准收费费率的上下限约束条件。

(3) 适应度函数的处理

关于适应度函数的转化确定, 为确定长合高速公路货车的最佳通行费率, 在调节路网交通流合理分配的同时, 保证企业财务效益, 本文对 REV 指标取值时, 综合考虑了长合高速的建设成本、环境治理成本以及管理运营、养护成本等费用支出, 并将其转换映射为单位时间(d)成本费用, 以便计算。

①关于道路建设成本, 本文将收费道路的建设

成本转换映射为单位时间成本费用。结合长合高速公路实际建设成本为 1 119 734 万元, 经营年限为 30 年, 量纲转换修正系数取值 $\Psi=2.153 \cdot 10^{-3} (1/\text{day})$, 则长合高速公路单位时间建设成本 I_J 具体可表示为:

$$I_J = 2.153 \cdot 10^{-3} \sigma(t_a^0/24) C_{a\max}, a \in A^* \quad (36)$$

②关于环境治理成本, 本文将环境治理成本因子 r 取值 0.043 元/(veh·km), 则长合高速公路单位时间环境治理成本 I_H 具体可表示为:

$$I_H = \sum_{g=1}^6 \Gamma_g x_{ag} 0.043 \cdot l_a \quad (37)$$

③关于管理运营成本, 根据长合高速收费站设置, 该项目通车后的管理运营费用确定为 21 万元/km。考虑职工工资增长引起管理费用的增长, 设定以年均 3% 的幅度增长。为方便计算, 根据经营年限, 本文将其整体进行均值化处理, 则长合高速公路单位时间管理运营成本 I_G 具体可表示为:

$$I_G = \frac{1}{n \times 365} \sum_{i=1}^n 210\,000 \times l_a (1 + 3\%)^{n-1} \quad (38)$$

④关于养护管理成本, 由式(4)可知, 该模型相关参数需结合目标高速公路历年实际流量以及相关建管养支出费用等指标进行拟合, 在实际应用中容易出现误差。考虑到目前长合高速通车不到一年, 道路整体路况处于较好状态。因此, 本文将长合高速公路通车基年的公路养护及小修费用确定为 8 万元/km, 运营期内的年均增长幅度确定为 3%。为方便计算, 根据经营年限, 将其进行均值化处理, 则长合高速公路单位时间养护管理成本 I_Y 具体可表示为:

$$I_Y = \frac{1}{n \times 365} \sum_{i=1}^n 80\,000 \times l_a (1 + 3\%)^{n-1} \quad (39)$$

同时, 考虑到本文仅从货车角度进行差异化收费, 而高速公路收费收入的组成涉及客、货车两类。长合高速客车收费标准以一类车为基数, 按照 0.65 元/(veh·km) 计收, 桥隧不单独计费; 一类

至四类客车的收费级差系数分别为 1:2:3:4,结合表 4 中长合高速现行相关流量可求得关于客、货车各自收费收入约占项目总收费收入的 40.84%、59.16%。从侧面反映出,尽管长合高速中的一类客车流量占比较大,能达到约 62.74% 左右,但由于其收费级差系数远低于货车,且运输通道内大型货车占据了一定比例,导致货车整体收费收入占据较大比重。考虑到本文仅对货车进行研究,为保证长合高速公路经营企业获得合理的财务效益,因此,本文假设长合高速相关经营成本支出约 59.16% 通过货车收费收入进行偿还。

综上所述,根据式(36)~(39),长合高速公路经营成本函数具体可表示为:

$$I = 0.5916 \cdot (I_J + I_G + I_Y) + \sum_{g=1}^6 \Gamma_g x_{ag} \cdot 0.043 \cdot l_a \quad (40)$$

则式(40)可以转化为:

$$\omega = \left| \sum_{a \in A} \sum_{g \in 1}^6 \zeta_{ag} y_a x_{ag} l_a - 0.5916 \cdot (I_J + I_G + I_Y) - \sum_{g=1}^6 \Gamma_g x_{ag} \cdot 0.043 \cdot l_a \right| \quad (41)$$

3.2 结果分析

通过选用 Matlab(2018b)软件对算例进行求解处理,根据结果显示,经过约 133.69 s,迭代约 56 次,退火最终温度达到约 $4.768 \cdot 10^{-5}$ 时停止,此时目标函数值约 10 108.81,目标道路不同车型所对应的费率以及在最优通行费率下不同路段的交通量分配结果,分别如表 5、表 6 所示。

表 5 弹性需求模式下测算结果

Table 5 Elastic demand calculating results

各车型收费费率						上层目标 函数值	长合高速公 路货车交通 量/(veh·d ⁻¹)
一类	二类	三类	四类	五类	六类		
0.504	0.906	1.664	2.056	2.471	2.743	10 108.81	4 779

根据前文基于双层规划理论构造的弹性需求下的高速公路货车费率优化模型,实现了对长合高速公路收费费率的测算以及路网流量的预测分配。此时,收费标准以一类货车为基准,按 0.504 元/(veh·km)综合费率计收,与长合高速公路货车原收费费率 0.60 元/(veh·km)作对比,则此时折扣约为 8.4 折。

根据表 7,费率优化后的长合高速公路货车总流量达到了 4 779 veh/d,与现行路网区间内流

表 6 区域路网中各路段交通量分配结果

Table 6 Traffic assignment results of the route in the area

路段	交通量/(veh·d ⁻¹)					
	一类	二类	三类	四类	五类	六类
1	245	517	155	608	62	1 093
2	226	477	143	561	57	1 009
3	245	517	155	608	62	1 093
4	226	477	143	561	57	1 009
5	229	479	145	563	56	1 013
6	211	442	134	520	52	935

量相比较,提升约 20.69%;区域高速公路网内的分担率约为 48.13%,提升约 8.26%,此时区域路网内两条通道上流量整体分配较为均衡,保证了路网良好的通行效益;从企业财务效益来看,目标道路收费收入提升约 5.88%,在降低物流运输成本的同时能保证经营企业能获得一定的收费经营效益,避免亏损现象的发生。同时,由于该区域通道内六型货车比例相对较大,导致货车通行费减免额较大,与长合高速原收费费率相比较,现行流量会导致目标道路整体通行费减少约 13.56 万元/d。

表 7 长合高速公路计算结果对比

Table 7 Comparing results between the model and actual traffic flow

研究方法	货车日均流量/(veh·d ⁻¹)	道路利用率/%	货车通行费收入/(万元·d ⁻¹)	货车通行费减免/(万元·d ⁻¹)
传统方法	3 959	39.87	67.21	—
本文模型	4 779	48.13	71.16	13.56

同时,结合调查问卷情境设计结果,当长合高速打 8.5 折时,所采访的 201 名道路使用者中约 49.97% 选择该道路出行,与本文模型测算分担率结果较为近似,与实际情况相符,理论上处于合理范畴。因此,基于对长合高速货车收费费率的优化,提出对整条高速公路上的货车实行 8.4 折的差异化收费策略。

4 结束语

通过对货车驾驶员的出行选择进行调查分析,结果表明大多数货车驾驶员在出行路径选择规划时更偏向于所直接消耗的通行费用成本最少的路径;其次是道路行程时间;而舒适性费用,即本次行程结束后的驾驶员疲劳恢复休息时长,该指标通常与出行用户个体差异性有关;本文上层规划描述路网管理者追求社会效益最大化的思

想,选用网络用户盈余最大作为上层优化目标^[21],并将高速公路经营企业相关道路建设成本、环境治理成本和营运管理成本等支出作为约束条件;下层模型选用弹性需求下的随机用户均衡模型描述货车驾驶员出行选择行为,建立了高速公路货车差异化收费双层优化模型。以重庆市长合高速公路为例,验证了传统收费方式和本文收费方式的实施效果。结果表明,与现行路网区间运行情况相比较,经本文方法优化后高速公路货车总流量提升约20.69%;区域高速公路网内的分担率提升了约8.26%;从企业财务效益来看,目标道路收费收入提升约5.88%。综上,本文方法在降低物流运输成本的同时能保证经营企业能获得一定的收费经营效益,避免亏损现象的发生。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委等24部门. 关于推动物流高质量发展促进形成强大国内市场的意见(发改经贸〔2019〕352号)[EB/OL]. [2024-12-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201903/t20190301_962405_ext.html.
- [2] 交通运输部,国家发展改革委,财政部. 全面推广高速公路差异化收费实施方案(交公路函〔2021〕228号)[EB/OL]. [2024-12-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/15/content_5617919.htm.
- [3] Yang H, Meng Q. Highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme[J]. *Transportation Research Part A*, 2000, 34(3): 207-222.
- [4] Swami H, Bari C, Dhamaniya A. Developing policy framework of dynamic toll pricing in India[J]. *Transportation Research Procedia*, 2021, 52(6): 605-612.
- [5] 唐俊忠,顾敬岩,吴群琪. 高速公路货运通行费标准变化的弹性分析[J]. *价格理论与实践*, 2015(3): 54-56.
Tang Jun-zhong, Gu Jing-yan, Wu Qun-qi. Elasticity analysis of changes in highway freight toll rates[J]. *Price Theory and Practice*, 2015(3): 54-56.
- [6] Sudhltter P, Zarzuelo, José M. Characterizations of highway toll pricing methods[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 260(1): 161-170.
- [7] Lu Z, Meng Q. Impacts of pavement deterioration and maintenance cost on Pareto-efficient contracts for highway franchising[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 113: 1-21.
- [8] Laval J A, Cho H W, Muoz J C, et al. Real-time congestion pricing strategies for toll facilities[J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2015, 71: 19-31.
- [9] Li T, Sun H, Wu J, et al. Optimal toll of new highway in the equilibrium framework of heterogeneous households' residential location choice[J]. *Transportation Research*, 2017, 105(11): 123-137.
- [10] Maffii S, Parolin R. Applying social marginal costs pricing to the road sector[J]. *Research in Transportation Economics*, 2010, 30(9): 38-42.
- [11] 裴莉莉,孙朝云,韩雨希,等. 基于SSC与XGBoost的高速公路异常收费数据修复算法[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2022, 52(10): 2325-2332.
Pei Li-li, Sun Chao-yun, Han Yu-xi, et al. Highway toll anomaly data repair algorithm based on SSC and XGBoost[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(10): 2325-2332.
- [12] 黄亚飞,刘涛. 路网最优费率的双层规划模型及算法[J]. *交通运输工程学报*, 2006, 6(4): 105-111.
Huang Ya-fei, Liu Tao. Bi-level programming model and algorithm of optimal toll rate for highway network[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006, 6(4): 105-111.
- [13] 孔德学. 高速公路可变收费对货车出行选择行为的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学交通运输学院, 2021.
Kong De-xue. Study on the impact of variable expressway tolls on truck travel choice behavior[D]. Chongqing: College of Transportation, Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [14] 肖清榆,袁振洲,吴玥琳,等. 差异化收费条件下的货车出行行为研究[J]. *交通信息与安全*, 2019, 37(5): 133-140.
Xiao Qing-yu, Yuan Zhen-zhou, Wu Yue-lin, et al. A study on travel behaviors of trucks under differentiated charge[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2019, 37(5): 133-140.
- [15] 王林,冯国帅,吴双,等. 汉宜高速公路分路段差异化收费费率研究[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(1): 183-190.
Wang Lin, Feng Guo-shuai, Wu Shuang, et al. Study on differential toll rates for different sections of Wuhan-Yichang expressway[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*,

- 2022, 39(1): 183-190.
- [16] 李昊, 虞明远, 余艳春, 等. 基于车辆排放水平的差异化公路通行费率的分析[J]. 公路交通科技, 2018, 280(6): 141-148.
- Li Hao, Yu Ming-yuan, Yu Yan-chun, et al. Analysis on differentiated highway toll rate based on vehicle emission level[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 280(6): 141-148.
- [17] 王江锋, 李秀东, 宋之凡, 等. 考虑碳减排收益的高速公路差异化收费定价模型[J]. 华南理工大学学报, 2024, 52(8): 14-21.
- Wang Jiang-feng, Li Xiu-dong, Song Zhi-fan, et al. A differentiated toll pricing model for highways considering carbon emission reduction benefits[J]. Journal of South China University of Technology, 2024, 52(8): 14-21.
- [18] 中华人民共和国国务院. 收费公路管理条例(国务院令 第 417 号)[EB/OL]. [2024-12-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2004/content_63005.htm.
- [19] 杨兆升, 王伟, 刘雪杰, 等. 公路网分车型收费费率优化算法研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 119-123.
- Yang Zhao-sheng, Wang Wei, Liu Xue-jie, et al. Research on optimal algorithm of toll rate for different vehicle types in highway network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 119-123.
- [20] 游锦龙. 广东省高速公路大小修费用模型标定研究[J]. 广东公路交通, 2011, 23(3): 92-94.
- You Jin-long. Calibration study of highway major and minor repair cost model in guangdong province [J]. Guangdong Highway Traffic, 2011, 23(3): 92-94.
- [21] 赵棒. 基于双层规划的高速公路收费费率优化模型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学经济与管理学院, 2021.
- Zhao Bang. Research on optimization model of expressway toll rate based on bi-level programming[D]. Chongqing: College of Economic and Management, Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [22] 刘伟铭, 付凌峰, 姜山. 路网下收费道路的分车型费率优化模型[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008(2): 1-6.
- Liu Wei-ming, Fu Ling-feng, Jiang Shan. Optimal model of multi-class toll rate for toll road in road network[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2008(2): 1-6.
- [23] 刘伟铭. 道路收费系统的优化模型及算法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.