

# 城市环线高速公路通行费标准的 SUE 确定方法

马 曛,付 鑫,王建伟

(长安大学 经济与管理学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**文章分析了城市环线高速公路收费费率与交通量,进而与收费额之间的相互关系及特点,针对城市环线高速公路通行费标准确定问题,提出了基本思路及解决方法。以重庆规划高速公路网和预测交通量为基础,构建了包含通行费因素的广义交通阻抗函数,借助 TRANSCAD 交通规划软件,完成了 SUE 模型下绕城高速公路交通量分配,并确定了重庆绕城高速的理论最优通行费率。

**关键词:**通行费标准;绕城高速公路;SUE 模型;交通阻抗;重庆

**中图分类号:**F540.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-5831(2012)05-0017-06

重庆绕城高速公路是重庆市高速路网规划确定的“二环八射”中的重要“一环”,对满足影响区内快速增长的交通需求,实现重庆“半小时主城区,一小时经济圈,八小时大重庆”战略目标,促进重庆建设成长江上游经济中心,具有重要的战略意义。

重庆绕城高速公路起于北碚,途经沙坪坝、九龙坡、江津、巴南、南岸、江北、渝北八个行政区,环接于北碚。全线由东、南、西、北四个段落闭合而成。绕城高速开通后,北碚、江津、巴南及渝北等地将归入绕城高速的直接辐射范围之内,可大大提升重庆主城区与其周边经济组团,以及各组团间的联系效率。

重庆绕城高速公路设计全长 186.45 公里,双向六车道。其中西段设计车速 120 公里/小时,其余路段设计车速 100 公里/小时。全线桥涵设计荷载采用公路 I 级,东北段其余技术指标按《公路工程技术标准》(JTGB01-2003)执行,西南段其余技术指标符合部颁《公路工程技术标准》(JTJ001-97)规定值。

绕城高速全线设有 16 个匝道收费站,8 个枢纽互通,与渝武(胜)高速、渝遂(宁)高速、成(都)渝高速、渝黔高速、渝湘高速、渝宜(昌)高速、渝邻(水)高速以及渝泸(州)高速相交。

重庆绕城高速公路工程概算总投资约 131.8 亿元,平均每公里造价约为 7 070.53 万元。总投资中的 48.4% (约 63.8 亿元)由交通运输部、重庆市交委和重庆所辖各区县共同投资作为资本金,其余的 51.6% 为银行贷款,贷款总额约 68 亿<sup>①</sup>。

收稿日期:2011-11-22

基金项目:国家社会科学基金西部项目(09JXJY004);中央高校基本科研业务费专项资金重点项目(Z1101)

作者简介:马曛(1968-),男,陕西绥德人,长安大学经济与管理学院副教授,硕士研究生导师,主要从事交通运输规划与管理、交通经济、物流管理研究。

①项目描述中的相关数据均由重庆高速集团提供。

项目已于2009年建成通车,全线采用封闭收费制式。笔者针对重庆绕城高速公路通行费收费标准问题进行相关研究。

### 一、重庆绕城高速公路收费特点

绕城高速公路与无环简单路径相比,制定收费标准的影响因素要复杂得多。受放射线影响,绕城高速具有路径选择多样性、市域路网构成复杂性等特征,收费交通量与收费标准之间的“悖反”特性明显(二者的“悖反”关系是指在具备多路径选择的复杂路网结构中,某线路分担交通量与其交通阻抗之间存在此消彼长关系,通行费是构成交通阻抗的重要因素之一。如图1所示)。复杂路网条件下,交通量分配对个别路径的阻抗表现出强弹性特征,即如果该路径阻抗增加,极易引起交通量向其他并行路径转移。对收费部门的启示是,复杂路网状态下,一味提高某路段收费标准,并不一定能达到增加通行费收入的目的。收费标准与通行费收入之间的关系如图2所示。

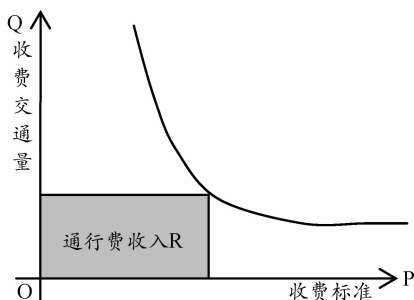


图1 收费交通量与收费标准的悖反

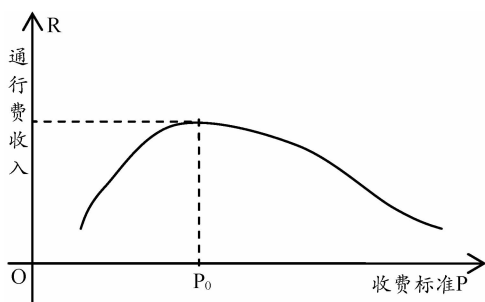


图2 收费标准

重庆绕城高速建成后,现有内环高速取消直接收费作为城市道路存在。内环线的停止收费客观上形成交通阻抗的洼地优势,从而对绕城高速公路收费运营带来较大压力。因此,在重庆绕城高速公路收费标准研究中,如何正确处理与内环线的交通分担比例关系,是整个研究工作的核心问题。

### 二、相关理论综述

重庆绕城高速公路及其所处路网状态属典型的复杂路网类型。复杂路网是相对于路网形成初期的简单类型而言的。随着路网规模的不断扩张,出行

起讫点间的可选择路径不断增加,各备选路径阻抗的异化程度减弱,进而形成了复杂路网条件。在复杂路网环境下,出行选择的不确定性变得更加突出,出行影响因素亦更为复杂。顾前等<sup>[1]</sup>对复杂网络以及复杂城市道路网进行了定义,并对城市内部及周边路网的复杂性进行了特征分析和归纳。陈义华等<sup>[2]</sup>针对城市轨道交通客流预测问题,建立了交通方式划分与交通分配的联合模型。由于研究目的不同,模型仅在既定广义费率水平下对城市轨道交通客流预测及分配问题进行了研究,并未针对通行费制定本身展开研究。罗文昌<sup>[3]</sup>在交通出行生成量假定基础上,研究了混合交通OD分布与随机用户平衡分配组合问题。

高速公路通行费费率制定理论研究,目前成果大多围绕费率标准制定的原则、影响因素等方面进行定性陈述,且仅局限于简单路网条件。在定量研究方面,De Palma等<sup>[4-6]</sup>以社会福利最优为目标对道路通行费标准进行了测算,并对用户出行需求的差异化特征进行模型化的描述,对市区路网的拥挤性收费定价问题进行了研究。毕星等<sup>[7]</sup>从成本法、收益法、级差效益法等角度,对公路收费标准问题进行了探讨。杨兆升等<sup>[8-9]</sup>分析了高速公路开通后与区域路网的影响关系,并借助交通量分配模型、通道转移模型分析了高速公路收费费率与收费交通量的相互关系。

在简单路网条件下,传统通行费费率的制定往往将预测交通量作为既定常态量,并未将交通量作为通行费率的动态因变量包含在通行费费率的测量中。与简单路网条件相比,复杂路网条件下用户对直接付现成本的敏感度较高,因此采用传统的级差效益法不能很好地满足城市收费道路通行费标准制定的要求,只有将通行费纳入路网广义阻抗的重要组成部分前提下,系统分析不同通行费率水平与路网交通量动态分配,以及与总体收费额之间的动态关系,才能实现通行费率标准制定的理论择优支持。

### 三、随机用户均衡交通量分配方法引入

随机用户均衡分配方法(Stochastic User Equilibrium, SUE)是指通过迭代计算实现的一种交通流分配状态。在该状态下,任一出行者均不可能通过单方面改变出行路径策略来减少自己的估计行驶阻抗,用户对出行道路阻抗的估计具有随机不确定性,且随机概率分布已知。

根据对绕城高速公路交通量的构成和特点分析,认为本项目道路使用者在出行选择过程中,由于重庆市及周边路网的复杂性,道路对使用者所产生

的交通阻抗具有随机不确定性。因此,在交通量分配方法选择上,可按照 SUE 方法进行分配。

SUE 基本原理和算法<sup>[10-12]</sup>如下。

随机用户均衡分配中,用户路径行为遵循 Wardrop 第一原理,且按照用户自我估计阻抗最小进行路径选择。因此,连接 OD 对的 $(r,s)$ 的路径 $k$ 被选择的概率 $p_k^s$ ,就是其估计阻抗在该 OD 对间所有可能路径的估计阻抗中为最小的概率,即:

$$P_k^{rs} = P_k^s(t) = P(C_k^{rs} \leq C_l^s, \forall l \neq k \in \varphi_{rs} | t)$$

式中, $C_k^{rs}$ 表示估计阻抗的随机变量。

$C_k^{rs} = \sum_a T_a \delta_{a,k}^{rs}, \forall r,s,k$  ( $T_a$ 表示路段 $a$ 上的估计阻抗; $\delta_{a,k}^{rs}$ 为 $0 \sim 1$ 变量,如果路段 $a$ 在 OD 对 $(r,s)$ 间的第 $k$ 条路径上,则 $\delta_{a,k}^{rs} = 1$ ,否则 $\delta_{a,k}^{rs} = 0$ 。)

在该均衡状态下,某个 OD 对 $(r,s)$ 之间所有已被选用的路径上,并不一定有相同的实际阻抗值,只满足下述条件:

$$f_k^s = q_{rs} P_k^s, \forall k,r,s$$

式中, $q_{rs}$ 是 OD 对 $(r,s)$ 之间的 OD 交通量。经过路径 $k$ 的流量 $f_k^s$ 与 $P_k^s$ 有关,而 $P_k^s$ 与估计路径阻抗大小有关,估计路径阻抗与实际路段阻抗有关,并且是随机变量,实际路段阻抗又是该路段交通流量的函数,如此循环相依,达成 SUE 的条件。

按照交通分配基本规划模型的建模思路,构造一个数学规划模型如下:

$$\min Z(x) = - \sum_{rs} q_{rs} \times E[\min_{k \in \psi_{rs}} \{C_k^{rs}\} | c^{rs}(x)] + \sum_a x_a t_a(x_a) - \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$$

该模型仅是一个无约束的极小化问题,没有任何直观的行为或经济上的解释。经证明该模型解满足 SUE 条件,并且在各节点上满足网络环境下的所有守恒约束。

SUE 算法的基本步骤可归纳如图 3 所示。

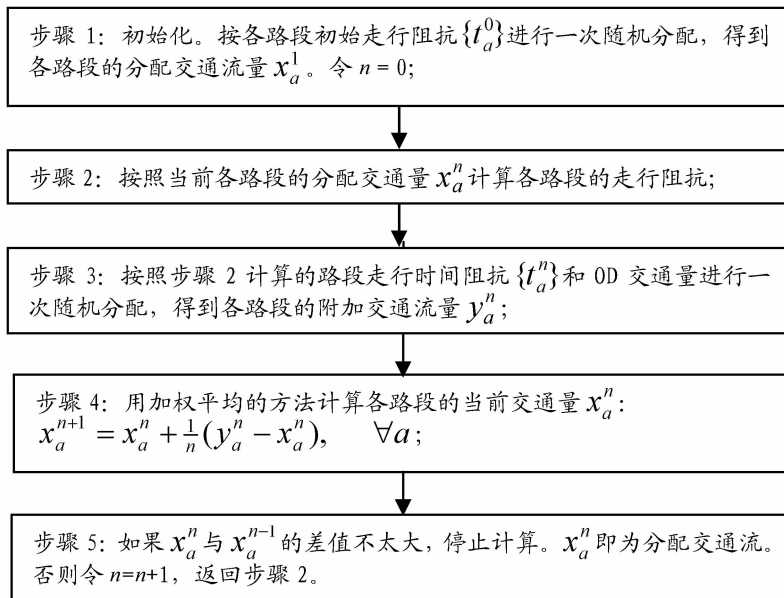


图 3 SUE 迭代分配过程流程图

#### 四、路段交通阻抗确定方法

对于道路阻抗函数的研究,既可进行假设条件下的纯理论研究,也可通过实测数据进行回归分析研究。其中被广泛运用于实际问题解决的是由美国公共道路局(Bureau of Public Road, BPR)开发的 BPR 函数,其标准形式为:

$$T_a = \bar{T} \cdot [1 + \alpha(\frac{V}{C})^\beta] \quad (1)$$

式中: $T_a$ 为路段交通(时间)阻抗; $\bar{T}$ 为自由流交通(时间)阻抗; $V$ 为路线上运行交通量; $C$ 为路线通行能力; $\alpha, \beta$ 为标定参数。

选定 BPR 函数作为阻抗计算的公式,其主要原因有以下几个方面:(1) BPR 函数由美国道路局开

发,是目前国内外针对道路交通阻抗计算相对成熟、应用较为广泛的交通阻抗函数。其基本思想是根据道路的设计交通量、设计车速等理论参数值,给出不同交通量情况下的车辆行驶时间,从而给出交通量与道路使用情况的关系;(2) BPR 函数中,参数可控性较好,只需要对函数中两个参数进行标定,即可进行使用;(3) BPR 函数中涉及的道路理论行驶时间的概念,可以理解为道路广义行驶时间,可以根据项目研究的实际,对道路理论行驶时间进行修正,满足项目研究的需要;(4) 级差效益法、成本法等传统方法只能简单给出单一情况下的成本节约数值,与实际出入较大。与传统方法相比,通过 BPR 函数计算阻抗,可有效解决路网交通流针对不同费用和道路使

用情况下的迭代求解问题,对现实问题的解释度较高。

在借鉴了BPR函数的基础上,对道路阻抗进行进一步改进,使其更贴近项目本身的特点。由于绕城高速公路与城市周边及内部密集免费路网存在并行的特点,从而使路段通行费在交通出行选择过程中,是构成出行阻抗的重要组成部分,通行费与通行路段的运输成本、通行距离、实际通行时间、通行速度等共同组成了用户出行的广义阻抗。即在考虑道路阻抗(通常均以时间为表现形式)时,需要综合考虑路段通行的各方面影响因素,对道路通行的广义阻抗进行重新标定,而不是仅仅考虑行驶该路段所节约的绝对时间。基于以上认识,本项目的阻抗将以包含通行费率的广义综合费用阻抗而不是单一时间价值来表示,具体模型如下式所示:

$$T = m \times \frac{L \times VT}{V} + n \times [F + (TK + VC) \times L] \quad (2)$$

式中: $T$ 为路段综合费用阻抗(单位:元); $VT$ 为单位时间的经济价值(单位:元/小时); $L$ 为路段长度(单位:公里); $V$ 为路段设计车速(单位:公里/小时); $F$ 为路段固定费用(单位:元/次); $VC$ 为路段运行成本(单位:元/公里); $TK$ 为路段通行费率(单位:元/公里); $m, n$ 为该部分成本权重标定参数。

根据项目研究前期所获得的重庆市现有路网的通行交通量情况以及调研过程中收集的关于并行线路的通行能力和路况等资料,确定了路段的阻抗函数中各个参数和广义阻抗费用的各项数值。

对于BPR函数,经过对重庆现有高速公路网的交通分配的模拟与现实数据的比较,确定 $\alpha = 0.15$ ,  $\beta = 4$ ,具体做法是:结合现有高速公路网收费数据的OD数据,利用SUE方法进行路网交通量分配,将分配结果与实际路段交通量进行对比,对参数进行调整,取分配结果与实际情况最接近的参数数值。

对于路段设计通行能力,根据项目工程建设情况以及并行线路考察情况,确定绕城西南段通行能力为80 000标准小客车/日,东北段为55 000标准小客车/日,其并行路段根据实际情况取8 000~15 000标准小客车/日。

对于路段的时间经济价值,拟选取项目直接影响区内基年人均小时工资水平较为合理。经测算,最终选定的时间经济价值 $VT = 6.1$ 元/小时。

对于路段的设计车速,根据绕城建设高速公路可行性研究报告资料以及沿线实地测量结果,确定绕城高速公路西南段车速为100公里/小时,东北段为90公里/每小时,其并行线路的车速根据各段道

路的情况不同选定为30~50公里/小时。

对于固定费用来说,与重庆绕城高速公路并行的周边道路均不收费,高速公路通行费按车公里收取(货车若实行计重收费,按吨公里收取),也不包括固定费用,因此对于所有路段,固定费用 $F = 0$ 。

对于车辆的运行成本,主要根据油耗、道路路况、行驶速度和车辆折旧等影响因素综合确定,其中油耗和道路状况为主要影响因素。在参考了相关资料之后,确定高速公路运行成本为 $VC = 0.75$ 元/车公里,普通公路根据各段路况不同,选择 $VC = 0.97 \sim 1.13$ 元/车公里不等。

对于车辆的通行费率,本研究在交通量分配的过程中,采取针对不同的费率值,最终通过结果比较来确定满意解。在取值范围上,费率 $TK$ 的测算范围选取0.5元/公里~2.0元/公里(增幅步长为0.1元/公里),且对0.55元/公里~0.65元/公里费率范围进行了加密测算(增幅步长为0.01元/公里)。

对于成本权重标定参数 $m, n$ ,由于对路段的时间折算价值的认可程度因人而异,因此,对于时间折算价值不能与直接经济价值并重。本研究在具体操作过程中,参考相关研究资料,对时间价值和经济价值的权重进行不同比例情况下的验算,最终取值 $m = 0.3, n = 0.7$ 。

## 五、交通量分配结果

根据上述道路交通量分配方法和道路阻抗的计算方法,得到重庆绕城高速公路在不同费率情况的分担交通量,本研究使用TRANSCAD交通规划软件,分别对2008年现状交通量以及2010年、2015年预测交通量结果进行了交通量分配。受篇幅限制,笔者仅给出以2008年交通量在收费标准为0.6元/车公里水平下的交通量分配结果,如图4所示。

## 六、推荐费率确定

根据本研究内容和要求,重庆绕城高速公路收费费率方案制定的原则可以概括为:在不突破现有收费政策框架下,使收费额达到最优的费率标准。在遵循重庆现有高速公路收费标准的政策框架前提下,按照笔者确定的交通量预测的思路,最终给出了不同费率水平下的预计收费额结果(表1),并从中选定最优费率方案。

根据表1及图4的收费额测算结果,可以看到,基本费率为0.6元/车公里时,收费额取得阶段峰值,在收费额超过了0.65元/车公里后,由于高速公路阻抗超出了普通公路的阻抗的限值,交通量开始下滑,同时导致了通行费收入的下滑,但是在费率在1.1元/车公里之后,由于费率的上升明显,但交通量

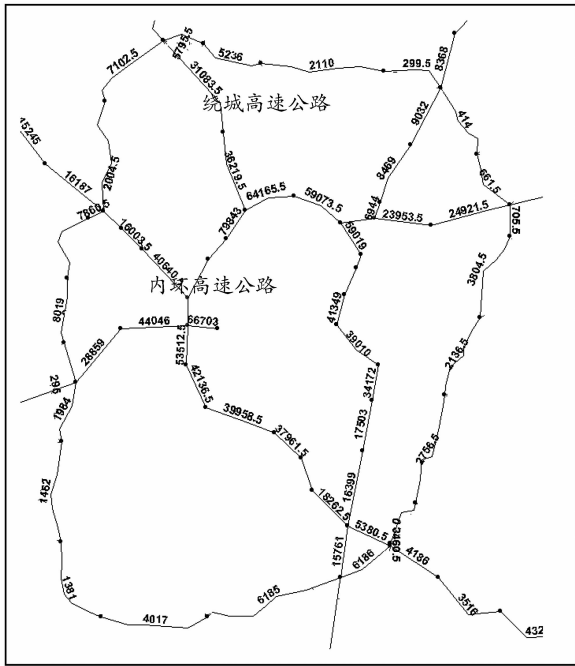


图 4 2008 年交通量分配结果示意图

(标准车,绕城标准为 0.6 元/车公里,内环不收费情况下)

的下降已经趋于平稳,因此收费额又开始回升。因此,从这个角度来讲,0.6 元/车公里是可以作为绕城高速公路的最优费率,虽然费率在 0.55 元/车公里 ~ 0.65 元/车公里的区间内,收费额的差异并不明显,如果费率高于或低于这个值,那么在相应的交通量的共同作用下,总体的收费额都会产生下滑。因此,从有利于偿还贷款角度讲,本研究推荐选定 0.6 元/车公里作为重庆绕城高速公路的基本费率。

表 1 不同费率下绕城高速特征年全线收费额变化表(单位:万元)

| 费率(元/车公里) | 2008 年 | 2010 年 | 2015 年 |
|-----------|--------|--------|--------|
| 2.00      | 8 336  | 10 639 | 17 223 |
| 1.90      | 8 475  | 10 814 | 17 600 |
| 1.80      | 86 02  | 10 934 | 17 866 |
| 1.70      | 8 469  | 10 767 | 17 598 |
| 1.60      | 8 113  | 10 315 | 17 061 |
| 1.50      | 7 771  | 9 697  | 16 220 |
| 1.40      | 7 149  | 9 095  | 15 194 |
| 1.30      | 6 642  | 8 479  | 14 137 |
| 1.20      | 6 640  | 8 464  | 14 290 |
| 1.10      | 6 293  | 8 055  | 13 656 |
| 1.00      | 6 572  | 8 366  | 18 708 |
| 0.90      | 8 094  | 10 332 | 20 536 |
| 0.80      | 9 373  | 12 182 | 25 515 |
| 0.70      | 11 123 | 15 444 | 26 678 |
| 0.65      | 14 865 | 19 689 | 33 782 |
| 0.64      | 14 742 | 19 421 | 33 484 |
| 0.63      | 14 616 | 19 152 | 33 179 |
| 0.62      | 15 255 | 19 605 | 34 048 |
| 0.61      | 14 800 | 19 859 | 34 152 |
| 0.60      | 15 581 | 19 907 | 34 340 |
| 0.59      | 15 322 | 19 575 | 33 851 |
| 0.58      | 15 185 | 19 402 | 33 583 |
| 0.57      | 15 007 | 19 174 | 34 033 |
| 0.56      | 14 750 | 18 837 | 33 467 |
| 0.55      | 14 799 | 18 900 | 32 874 |
| 0.50      | 14 375 | 18 880 | 32 239 |

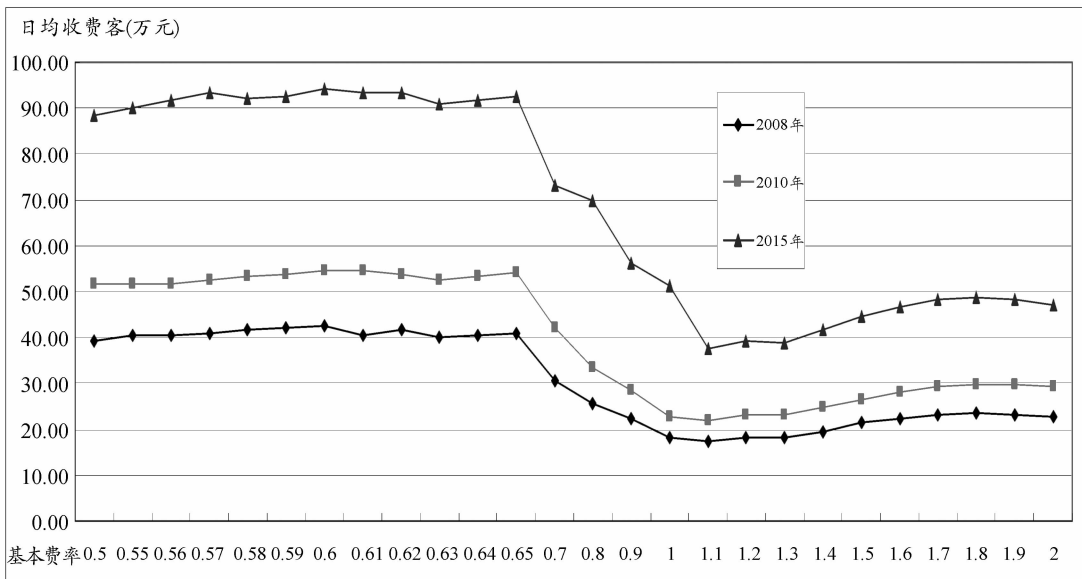


图 4 不同费率水平下绕城高速各特征年全线日均收费额变化示意图

七、总结

将通行费作为交通阻抗因素构建交通量随机分配模型,是确定绕城高速公路通行费标准的有效方

法。整个研究工作中,阻抗函数确定是研究工作的核心。SUE 模型对于处理强替代性路网内不同路段交通量分配问题具有很好的解释性。数据处理需要

专业软件介入,本研究正是在 TRANSCAD 交通规划软件帮助下得以顺利实现。本研究是在对重庆市城市路网简化的基础上完成的,研究重点集中在绕城高速与内环高速公路交通量合理分担问题上,所得结论对绕城高速通行费标准的最终决策仅具有理论参考意义。随着经济的持续发展和交通条件的改变,绕城高速公路收费最终会纳入重庆市交通年费制中。

#### 参考文献:

- [1] 顾前,杨旭华,王万良,等. 基于复杂网络的城市公共交通网络研究[J]. 计算机工程,2008,34(20):266-268.
- [2] 陈义华. 方式划分与路网配流联合模型[J]. 重庆大学学报,2005(10):99-103.
- [3] 罗文昌. 混合交通 OD 分布与随机平衡分配组合模型及算法[J]. 宁波大学学报:理工版,2007(4):481-486.
- [4] De PALMA A, LINDSEY R. Congestion pricing with heterogeneous travelers: a general-equilibrium welfare analysis[J]. *Networks&Spatial Economics*,2004,4(2):135-160.
- [5] SALAS M H, ROBUSTE F, SAURI S. Impact of two-part pricing scheme on social welfare for congested metropolitan expressway networks[J]. *Transportation Research Record*,2009(2115):102-109.
- [6] LIU L N, BOYCE D E. Variational inequality formulation of the system-optimal travel choice problem and efficient congestion tolls for a general transportation network with multiple time periods[J]. *Regional Science and Urban Economics*,2002,32(5):627-650.
- [7] 毕星,翁洁雄,胡元枢. 公路收费标准问题探讨[J]. 价格理论与实践,2005(7):34-35.
- [8] 杨兆升,杨志宏,赵丹华. 长平高速公路最优收费标准制定方法[J]. 交通运输工程学报,2003,3(1):57-61.
- [9] 初克波. 公路收费转移与合理制订收费标准的研究[J]. 西南交通大学学报,2002,37(1):65-67.
- [10] 陆化普. 交通规划理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [11] 袁鹏程,韩印,范炳全. 网络流量随机条件下的随机交通网络平衡分析[J]. 城市交通,2007(3):53-57.
- [12] 任刚,王伟. 基于转向的 Logit 交通分配算法[J]. 交通运输工程学报,2005,5(4):101-105.

## A Study on the Toll Rate Determination Method of Ring Expressway Based on SUE Model

MA Jian, FU Xin, WANG Jianwei

(School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

**Abstract:** Based on the analysis of the reciprocities among the toll rate, traffic volume and charge volume, and their features as well, the basic ideas and methods of the toll rate determination for ring expressway are put forward. The paper establishes the function of general traffic impedance which includes the tolls parameter under the preconditions of the highway planning and its forecast traffic volumes of Chongqing. By the use of the TRANSCAD, which is a traffic planning software, the traffic volumes on the ring expressway are assigned successfully helped by SUE model. Finally, the paper gives the optimal toll rate for the ring expressway of Chongqing.

**Key words:** toll rate; ring expressway; SUE model; traffic impedance; Chongqing City

(责任编辑 傅旭东)