

# 基于改进 MD 模型的城市交通出行方式 划分预测方法

王秋平, 孙 皓

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 基于 MD 模型预测原理, 结合城市居民出行特征, 综合考虑旅客出行时间、出行费用对旅客出行方式选择的影响, 对传统 MD 模型中包含的出行牺牲量计算公式进行了改进, 求得了各交通方式的安全性、舒适性、方便性量化值, 并得到了基于 MD 模型的城市交通出行方式划分预测模型。模型可用于预测新增交通方式的诱增交通量与划分结构, 分析预测年公交车、地铁费用变量与出行方式划分结构之间的规律。最后结合西安市的调查实例, 验证了该预测方法的可行性。研究结论可进一步丰富和完善城市交通出行方式划分预测理论。

**关键词:** 综合交通运输; 出行牺牲量; MD 模型; 出行方式划分; 费用变量

**中图分类号:** U121

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2017)03-0340-06

## Urban traffic modal splitting based on improved MD forecast model

WANG Qiuping, SUN Hao

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the principle of MD forecast model, combined with resident travel Characteristics in urban, fully considered passenger's travel time, travel cost, safety, comfort and convenience which influence passenger's traffic mode choice, improved the calculation formula for travel sacrificial in traditional MD forecast model, and obtained a prediction model of travel mode choice in urban based on MD forecast model. Model can be used to predict the induced traffic of new type transport facility and partition structure, analysis the change law of expense variable with partition structure of travel modal. Finally, combined with the investigation of Xi'an, the feasibility of the method was verified. Research conclusions may further enrich and improve the urban traffic modal splitting theory.

**Key words:** integrated transportation; travel sacrificial; MD forecast model; traffic modal splitting; expense variable

目前在交通方式划分预测方法上的主要研究成果可分为两大类: 以统计学为基础的集计模型和以概率学为基础的非集计模型<sup>[1]</sup>。与集计模型相比, 非集计模型所需样本容量小、数据统计处理简单, 数据可拓展和再利用, 对个体行为分析充分, 相对来说预测精度较高, 因而应用广泛, 逐渐取代了集计模型。Gerken 使用了广义效用的概念, 建立了一种广义的多项 Logit 模型, 使得模型可以相对简单的处理复杂问题<sup>[1]</sup>。易富君等人在分析影响经济圈交通方式选择的因素, 建立了基于 Nested-Logit 模型的经济圈交通方式划分方法<sup>[2]</sup>。任刚等人以蚌埠市为例采用 Logit 模型研究影响城市交通结构的主要因素, 建立了出行者属性与个体出行方式选择的合理关系模型<sup>[3]</sup>。孙启鹏等人考虑需求与供给的均衡性, 建立基于动态广义费用的交通方式选择 Logit 模型<sup>[4]</sup>。现有的交通方式选

择大部分采用基于 Logit 的分离模型, 但 Logit 模型存在 II A 特性和喜好随机性限制的缺陷, 这使得模型和算法存在一定的局限性。

MD 预测理论与方法是一种介于集计模型和非集计模型之间的预测理论与方法。本质上它是一种非集计交通方式划分模型, 以概率论为基础, 以经济学效应理论为原理, 以效用最大化理论、最小牺牲量理论为基础<sup>[6]</sup>, 考虑新增交通方式出现后的转移运量和诱增运量, 分析出行者个体对交通方式的选择行为。与 Logit 模型相比, MD 模型从需求和供给两个角度出发, 始终以各交通方式作为处理单元, 各交通方式之间相互独立, 能更科学的模拟旅客出行方式选择的过程。宋雪梅阐述了 MD 模型的基本原理, 对 MD 模型的计算方法进行研究<sup>[6]</sup>。彭辉等考虑时间、费用为影响因素, 利用 MD 模型对市区交通方式划分结构做了预测<sup>[7]</sup>。伍

拾煤利用 MD 模型,考虑了低碳因素对出行牺牲量的影响<sup>[8]</sup>.国内外已有关于交通方式划分的 MD 模型的研究,大多针对存在交通方式较少的客运通道,鲜有利用该模型针对宏观层面城市交通出行方式划分的研究;同时,对于出行时间、出行费用这两个重要影响因子的取值较笼统,精确性有待提高;且模型的改进研究较少.鉴于此,基于 MD 模型,考虑城市居民出行特征,精确统计各交通方式的出行费用、出行时间,计算安全性、舒适性和方便性等服务因素的综合取值,构建了新的出行牺牲量模型,确定了合理的参数取值,针对目前城市交通的现状,预测了未来城市交通方式划分结构.

## 1 MD 模型的基本原理

### 1.1 潜在客运需求 $Q_{ij}$

潜在客运需求是指城市居民中有可能出行的全部出行者总人数,并不考虑出行者的支付能力和最终能否实现该出行需要.

### 1.2 出行牺牲量 $S_m$

出行牺牲量也可以称为出行广义费用量,它是出行者在旅途中牺牲掉的时间、金钱、精力的综合值.在 MD 模型中,始终假设出行者选择最小出行牺牲量的交通方式.传统的 MD 模型认为对出行行为影响最大的是出行时间与出行费用,因此综合两者作为出行牺牲量.出行牺牲量用对数表示如下:

$$\ln(S_m) = \ln(C_m + vT_m) \quad (1)$$

式中:  $S_m$  表示交通方式  $m$  的出行牺牲量;  $C_m$  为出行费用,元;  $T_m$  为出行时间, h;  $v$  为出行时间价值,元/h,不同类型的出行者时间价值以收入水平、出行目的作为判别标准而有所不同.在 MD 预测模型中,认为时间价值呈对数正态分布,且随着时间的变化分布参数随之改变.

### 1.3 界限替代率 $V_{m,m-1}$

在出行牺牲量直线图上,交通方式  $m$  和  $m-1$  的直线交点称为界限替代率,可由式(1)推导出,见式(2):

$$V_{m,m-1} = \frac{C_m - C_{m-1}}{T_{(m-1)} - T_m} \quad (2)$$

根据界限替代率便可得出各个交通方式的时间价值区间,从而进一步计算各交通方式的选择比例.

### 1.4 出行效用 $u$

假设 MD 模型与出行时间价值一样,出行效用同样符合对数正态分布,且假设出行效用标准

差与出行时间价值标准差相同.

### 1.5 潜在需求显化率 $R_m$

在 MD 模型中,实现了的潜在客运需求量转化为实际需求量,二者的比率称为潜在需求显化率:

$$R_m = \frac{q_m}{Q} \quad (3)$$

式中:  $q_m$ ,  $Q$  分别为交通方式  $m$  的实际客运需求量、潜在客运需求量.

出行者会选择出行牺牲量为最小牺牲量时的交通方式,且出行需求实施的条件是出行者的出行效用大于其选择的出行方式的牺牲量.因此,通过计算时间价值和出行牺牲量两个概率分布组合点的体积,便可求得潜在需求显化率,如式:

$$R_m = \int_{\ln S_m}^{+\infty} f(\ln u) \int_{\ln v_{m,m-1}}^{\ln v_{m,m-1}} f(\ln v) d(\ln v) d(\ln u) \quad (4)$$

## 2 基于 MD 模型的城市交通方式划分预测方法

### 2.1 出行时间价值估计

我国劳动者报酬占 GDP 的相对份额大约为 0.6,因此可认为出行者时间价值的平均值为经济产值在单位时间内的 0.6 倍<sup>[8]</sup>,表达式为

$$\bar{v}_i = 0.6 \times \frac{GDP_i}{N_i A} \quad (5)$$

式中:  $\bar{v}_i$  表示基年城市的平均时间价值,元/h;  $GDP_i$  表示基年城市的地方生产总值,元;  $N_i$  表示基年城市的总人口数;  $A$  为平均工作时间,可用每年 50 个工作周、每周 5 个工作日、每个工作 8 h 来计算.时间价值方差根据文献<sup>[10]</sup>可知,我国居民收入分布的标准差为 7.066.居民收入水平为普遍的社会经济现象,因此标准差采取:  $\sigma_{\ln v} = 1.955$ .

### 2.2 出行效用估计

利用 MD 模型中潜在需求显化率的计算公式,可得:

$$Q_{ij} = \frac{q_{1ij}}{R_{1ij}} = \frac{q_{2ij}}{R_{2ij}} = \dots = \frac{q_{mij}}{R_{mij}} \quad (6)$$

由式(6)可得到  $C_m^2$  个方程,则,由  $C_m^2$  个方程和式(4)可以求出  $C_m^2$  个效用均值,最终效用均值采用平均值,即:

$$\mu_{\ln u} = \frac{1}{C_m^2} \sum_{k=1}^{C_m^2} (\mu_{\ln u})_k \quad (7)$$

出行效用均值与出行者收入水平之间有较大的相关性,而收入水平与 GDP 直接相关,因此,假设预测年时间价值的方差与基年相同,则预测

年时间价值的均值表示为

$$\mu_{\ln u} = \mu_{\ln v} \sqrt{\frac{GDP_i}{GDP_j}} \quad (8)$$

式中:  $\mu_{\ln u}$ 、 $\mu_{\ln v}$  分别为预测年、基年出行效用均值;  $GDP_i$ 、 $GDP_j$  分别为预测年、基年城市内生产总值。

### 2.3 出行牺牲量估计

根据出行牺牲量的计算公式(1),除了出行时间价值外,出行牺牲量的计算还涉及到出行费用和出行时间的计算。因城市内的几种主要交通方式其各自的出行费用计算方法不同,需根据实际情况分别计算。出行时间是一个统计量,需要经过实际交通调查得到。

(1)小汽车出行牺牲量的计算。根据公式(1),首先计算其出行费用,如下式:

$$c_l^{car} = \alpha_{0m}^{car} + v_l^{car(0)} [1 + 0.15 v_l^{car} / C_l^{car}]^4 + u^{car} + \tau_l^{car(0)}, \quad \forall l \in L^{car} \quad (9)$$

式中:  $c_l^{car}$  为小汽车路段  $l$  的路阻函数,元,由美国公路局 BPR 公式改进而成<sup>[8]</sup>;  $\alpha_{0m}^{car}$  为惩罚因子,元,表征小汽车运输方式的舒适性、安全性以及方便性;  $\tau_l^{car(0)}$  为小汽车路段  $l$  的自由流通行时间,  $h$ ;  $[1 + 0.15 v_l^{car} / C_l^{car}]^4$  为小汽车在路段  $l$  上的拥挤折算系数;  $v_l^{car}$  为小汽车路段  $l$  的交通量,  $veh/h$ ;  $C_l^{car}$  为小汽车路段  $l$  的路段通行能力  $veh/h$ ;  $u^{car}$  为该次出行停车费用,元;  $\tau_l^{car(0)}$  为小汽车路段  $l$  的自由流燃油费,元。则,小汽车该次出行的出行牺牲量表示为

$$\ln(S_l^{car}) = \ln[c_l^{car} + v(t_l^{car(1)} + t_l^{car(2)})], \quad \forall l \in L^{car} \quad (10)$$

式中,  $t_l^{car(1)}$  为小汽车的停车花费时间,  $h$ ;  $t_l^{car(2)}$  为小汽车乘客至目的地的步行时间,  $h$ 。

(2)公交车出行牺牲量的计算。

$$c_l^{bus} = \alpha_{0m}^{bus} + v_l^{bus} + 4(v_l^{bus} / B_l^{bus})^2 + \tau_l^{bus}, \quad \forall l \in L^{bus} \quad (11)$$

式中:  $c_l^{bus}$  为公交车路段  $l$  的路阻函数,元,由三部分组成:时间—费用、公交车票价、公交车拥挤费用。 $\alpha_{0m}^{bus}$  为公交车惩罚因子;  $\tau_l^{bus}$  为公交车路段  $l$  的通行时间,  $h$ ;  $4(v_l^{bus} / B_l^{bus})^2$  为公交车拥挤折算出行系数;  $B_l^{bus}$  为公交车在路段  $l$  上的标准容量,  $veh/m$ ;  $v_l^{bus}$  为公交车在路段  $l$  上的交通量,  $veh/m$ ;  $\tau_l^{bus}$  为公交车路段  $l$  的票价,元。则,公交车的出行牺牲量表示为

$$\ln(S_l^{bus}) = \ln[c_l^{bus} + v(t_l^{bus(1)} + t_l^{bus(2)})], \quad \forall l \in L^{bus} \quad (12)$$

其中:  $t_l^{bus(1)}$  表示公交车乘客等待公交车到来的时间,  $h$ ;  $t_l^{bus(2)}$  表示公交车乘客至目的地的步行时间,  $h$ 。

(3)轨道交通出行费用的计算。

参照公式(10)轨道交通的出行牺牲量表示为

$$\ln(S_l^{sub}) = \ln[c_l^{sub} + v(t_l^{sub(1)} + t_l^{sub(2)})], \quad \forall l \in L^{sub} \quad (13)$$

其中:  $t_l^{sub(1)}$ 、 $t_l^{sub(2)}$  分别表示路段  $l$  上的等待时间和步行至目的地的时间。

(4)非机动车出行费用的计算。

$$c_l^{motor} = \alpha_{0m}^{motor} + \alpha_{lm} \tau_l^{motor} + v_l^{motor} + u^{motor}, \quad \forall l \in L^{motor} \quad (14)$$

式中  $c_l^{motor}$  为非机动车路段  $l$  的路阻函数,其模型参考文献(5)、(6)由两部分组成:惩罚因子与交通费用。 $\alpha_{0m}^{motor}$  为非机动车惩罚因子;  $\alpha_{lm}$  为非机动车各项费用元素的换算系数,元;  $\tau_l^{motor}$  为非机动车在路段  $l$  上的运输费用,元;  $t_l^{motor}$  为非机动车在路段  $l$  上的行驶时间,  $h$ ;  $u^{motor}$  为非机动车该次出行的存车费用,元。则,非机动车车的出行牺牲量最终表示为

$$\ln(S_l^{motor}) = \ln[c_l^{motor} + v(t_l^{motor(1)} + t_l^{motor(2)})], \quad \forall l \in L^{motor} \quad (15)$$

其中:  $t_l^{motor(1)}$  表示非机动车乘客存车、取车所花费的时间,  $h$ ;  $t_l^{motor(2)}$  表示步行至目的地的时间,  $h$ 。

(5)出租车出行牺牲量的计算。

$$c_l^{taxi} = \alpha_{0m}^{taxi} + v_l^{taxi(0)} [1 + 0.15 v_l^{car} / C_l^{car}]^4 + \tau_l^{taxi(0)}, \quad \forall l \in L^{car} \quad (16)$$

式中:  $c_l^{taxi}$  为出租车路段  $l$  的费用函数,元;  $\alpha_{0m}^{taxi}$  为出租车惩罚因子;  $\tau_l^{taxi(0)}$  为出租车路段  $l$  的自由流通行时间;  $[1 + 0.15 v_l^{car} / C_l^{car}]^4$  为小汽车在路段  $l$  上的拥挤折算系数;  $v_l^{car}$  为小汽车路段  $l$  上的车流量,  $veh/h$ ;  $C_l^{car}$  为小汽车路段  $l$  上的路段通行能力,  $veh/h$ ;  $\tau_l^{taxi(0)}$  为出租车路段  $l$  的出租车费; 则,出租车的出行牺牲量表示为:

$$\ln(S_l^{taxi}) = \ln[c_l^{taxi} + v(t_l^{taxi(1)} + t_l^{taxi(2)})], \quad \forall l \in L^{car} \quad (17)$$

式中:  $t_l^{taxi(1)}$  为出租车拦截的等待时间,  $t_l^{taxi(2)}$  为出租车乘客到达目的地的步行时间。

(6)步行牺牲量的计算。

$$\ln(S_l^{walk}) = \ln[\alpha_{0m}^{walk} + v(t_l^{walk(0)} + t_l^{walk(1)})], \quad \forall l \in L^{walk} \quad (18)$$

式中:  $\alpha_{0m}^{walk}$  为步行惩罚因子;  $t_l^{walk(0)}$  为路段  $l$  的步行时间,  $h$ ;  $t_l^{walk(1)}$  为至目的地过程中的耽误时间,  $h$ ,如休息、临时停驻等。

出行牺牲量改变后,相应的,交通方式  $m$  和  $m-1$  的界限替代率也应变为各交通方式改进的出行牺牲量相同时求得的数值。

改进后的潜在需求显化率公式为

$$R'_m = \int_{\ln v_m}^{+\infty} (S'_m) f(\ln u) \int_{\ln v_{m-1}}^{\ln v_m, m+1} f(\ln v) d(\ln v) d(\ln u) \quad (19)$$

2.4 惩罚因子计算

由 MD 模型的理论意义可知, 界限替代率的取值是由小到大依次递增的, 即由时间价值取值最小的交通方式递增到时间价值最大的交通方式. 居民对可能的不同出行方式进行时间价值的评估后, 选择牺牲量最小的出行方式. 由于城市交通系统内, 时间价值最小的交通方式为自行车, 时间价值最大的交通方式为出租车出行, 根据潜在需求显化率公式(19)可知, 这两类交通方式其潜在需求显化率可表示为

$$R_{walk} = \int_{\ln(S_{ky})}^{+\infty} f(\ln u) \int_{\ln v_{ky,m}}^{+\infty} f(\ln v) d(\ln v) d(\ln u)$$
$$R_{taxi} = \int_{\ln(S_{taxi})}^{+\infty} f(\ln u) \int_{\ln v_{mi',taxi}}^{+\infty} f(\ln v) d(\ln v) d(\ln u)$$

并且基年的  $\mu_{\ln v}$ 、 $\sigma_{\ln v}$ 、 $\mu_{\ln u}$ 、 $\sigma_{\ln u}$ 、步行与小汽车的出行比例已知, 则有:

$$\frac{R_{walk}}{R_{taxi}} = \frac{\int_{\ln(S_{ky})}^{+\infty} f(\ln u) \int_{\ln v_{ky,m}}^{+\infty} f(\ln v) d(\ln v) d(\ln u)}{\int_{\ln(S_{taxi})}^{+\infty} f(\ln u) \int_{\ln v_{mi',taxi}}^{+\infty} f(\ln v) d(\ln v) d(\ln u)} = \frac{P_{ky}}{P_{taxi}}$$

设自行车的惩罚因子为 0, 带入该公式中即可得到出租车的惩罚因子, 继而求得其他交通方式的惩罚因子.

3 算例分析

3.1 基本调查数据与参数设定

以西安市为例, 对模型是否适用于预测城市交通出行方式划分进行验证. 2010 年西安市区人均 GDP 为 38 343 元/人, 计算得时间价值均值为 11.50 元/h, 则  $\mu_{\ln v} = 2.44$ . 根据 MD 模型的原始计算方法, 结合调查数据<sup>[10]</sup>, 可求得 2010 年的效用均值为 2.84.

西安市 2014 年 GDP 总值为 5 492.64 亿元, 人均生产总值为 63 794 元/人. 根据公式(6)计算得到 2014 年时间价值均值为 19.14 元/h, 则  $\mu_{\ln v} = 2.95$ ,  $\sigma_{\ln v} = 1.955$ . 西安市地铁于 2011 年 9 月 16 日开通地铁 2 号线, 于 2013 年 09 月 15 日开通地铁 1 号线, 仅运营两条线路. 对于小汽车、出租车出行牺牲量中的车辆拥挤折算系数参考 2014 年城市道路平均服务水平, 取值为 1.262 5, 公交车的拥挤折算系数取 0.1.

根据 2014 年对西安主城区居民的调查, 该年各出行方式的平均出行时间和城区居民出行方式结构如表 1、表 2 所示.

表 1 2014 年各出行方式的平均出行时间

Tab. 1 Various transports's average travel time in 2014

出行方式	小汽车	出租车	公交	地铁	自行车	电动车	步行
平均出行时间/min	40	35	56	45	35	29	21
平均出行费用/¥	11.45	18.48	2.36	4.46	0.70	6.67	0.16

表 2 2014 年西安市区交通出行方式构成

Tab. 2 The urban traffic model of Xi'an City in 2014

出行方式	小汽车	出租车	公交	自行车	电动车	步行	地铁
比例/%	15.18	6.50	31.35	8.43	7.94	24.01	5.52

3.2 模型计算

根据模型的计算方法, 带入调查数据求得的初始界限替代率如表 3 所示.

根据前文计算未来年效用均值的公式(6), 可求得出行效用均值  $\mu_{\ln u}$  为 3.387. 根据显化率计算公式, 为使惩罚因子均大于 0, 令计算求得的惩罚因子最小的公交车惩罚因子取值为 0, 将 2014 年的时间价值、出行效用、出行时间、费用等参数代入公式(4), 即可得到 2014 年各交通方式的惩罚因子取值, 如表 4 所示.

表 5 中, 将 MD 模型的计算结果与当年实际交通方式划分结构进行比较, 预测划分比例与实

际偏差不大, 计算结果较精确, 验证了模型中参数取值的准确性.

以此对 2020 年的交通方式结构划分进行预测, 2020 年西安的 GDP 目标总值为 9 000 亿元, 预期都市区人口达 1 280 万, 据此可得时间价值均值为 21.1 元/h, 则  $\mu_{\ln v} = 3.05$ ,  $\sigma_{\ln v} = 1.96$ . 将 2020 年的预测时间价值均值、时间价值方差、效用均值、效用方差以及不同费用变量条件下各个交通方式的牺牲量带入模型中, 得到的预测结果变化情况如图 1、图 2 所示, 计算数据如表 6 所示. 因篇幅所限仅列出了交通方式结构随费用变量变化的结果, 模型也可通过调整其他变量进行结果分析.

表 3 界限替代率  $v_{m,m-1}$

Tab. 3 Boundary points of various transports  $v_{m,m-1}$

交通方式	1	2	3	4	5	6	7
界限替代率范围	$(-\infty \sim 5.156\ 8)$	$(5.156\ 8 \sim 8.302\ 9)$	$(8.302\ 9 \sim 13.355\ 1)$	$(13.355\ 1 \sim 70.854\ 3)$	$(70.877\ 3 \sim 85.854\ 3)$	$(85.877\ 3 \sim 124.382\ 3)$	$(124.382\ 3 \sim +\infty)$

表 4 各出行方式的惩罚因子计算值

Tab. 4 Various transport's  $\alpha_{0m}^m$  value

出行方式	小汽车	出租车	公交	自行车	电动车	步行	地铁
$\alpha_{0m}$	8.606	2.254	0.000	5.914	7.244	12.417	0.198

表 5 2014 年模型预测数据

Tab. 5 Model operation data of 2014

交通方式	自行车	公交		电动车	小汽车	出租车	步行
		常规	地铁				
牺牲量 $S_{i,j}^m$	17.126 5	23.505 8	28.613 7	27.372 4	33.160 7	33.894 3	19.281 5
显化率 $R_{i,j}^m$	0.041 8	0.153 9	0.027 0	0.038 1	0.074 4	0.032 5	0.121 4
预测划分比例	0.105 5	0.284 7	0.035 2	0.077 8	0.152 1	0.076 5	0.258 2
实际划分比例	0.084 3	0.315 3	0.055 2	0.079 4	0.151 8	0.065 0	0.240 1

表 6 2020 年模型预测数据

Tab. 6 Model operation data in 2020

费用变量			自行车	公交		电动车	小汽车	出租车	步行
				常规	地铁				
公交票价值 /元	1.5	预测划分比例	0.083 7	0.332 9	0.048 1	0.080 7	0.148 2	0.066 1	0.240 3
	1.0		0.105 1	0.341 9	0.044 5	0.086 8	0.150 0	0.058 2	0.213 5
	0.5		0.117 8	0.357 9	0.039 5	0.087 5	0.150 5	0.053 6	0.193 2
地铁票价值 /元	3.5	预测划分比例	0.071 1	0.351 7	0.036 7	0.063 5	0.153 5	0.075 7	0.247 8
	3.0		0.083 7	0.332 9	0.048 1	0.080 7	0.148 2	0.066 1	0.240 3
	2.5		0.091 3	0.325 8	0.064 5	0.091 3	0.141 7	0.047 6	0.237 8
	2.0		0.097 3	0.311 5	0.081 5	0.097 7	0.140 5	0.034 5	0.237 0

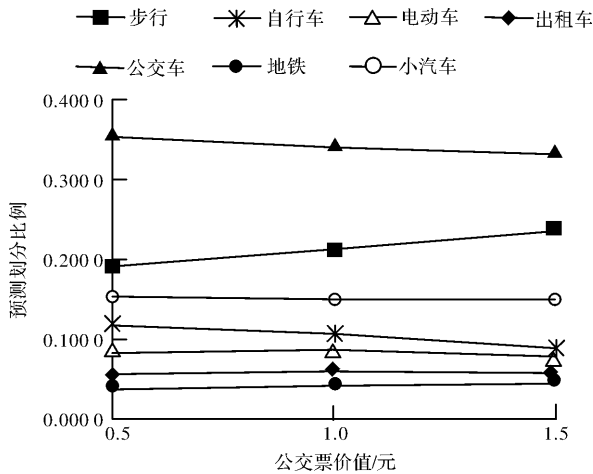


图 1 公交票价值改变时的预测划分比例情况

Fig. 1 Operation data when bus ticket value changes

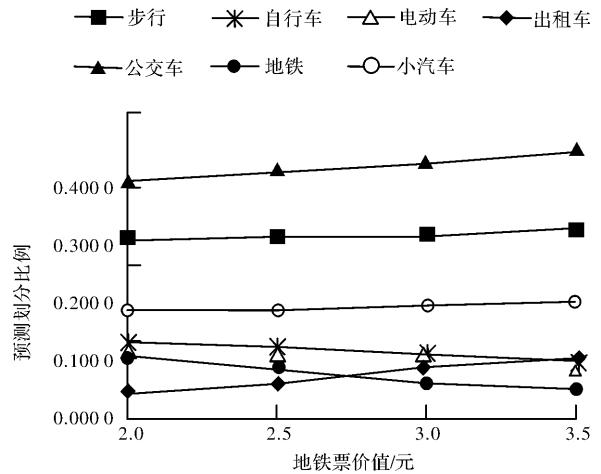


图 2 地铁票价值改变时的预测划分比例情况

Fig. 2 Operation data when the subway ticket value changes

由表6可知,随着公交票价的降低,公交车出行比例增大,与公交车出行牺牲量相近的地铁与步行出行比例下降幅度较大,出租车出行比例小幅度下降,相对的自行车出行比例增加,电动车出行基本无影响,因公交出行与小汽车出行的出行牺牲量差距较大,公交票价的变动对出行费用最高的小汽车影响不大。

而随着地铁票价的降低,地铁出行比例增大,与地铁出行牺牲量相近的公交车与出租车出行比例下降幅度较大。因地铁出行划分比例较小,其票价的改变对慢行出行方式的影响较小。随着地铁出行划分比例的增大,其票价的改变对其他出行方式的影响也将逐渐增大。通过预测结果可以看出费用变量对出行方式划分带来的影响,票价上升将导致该出行方式的需求下降,与其出行牺牲量相近的出行方式的需求上升,数据结果能够反映出行者个体服从效用最大化、牺牲量最小化的出行原则。

## 4 结论

(1)通过改进传统MD模型中的出行牺牲量计算公式,并对预测结果与实际结果进行比对分析可知,所建立的预测模型相对误差较小,可体现各交通方式的不同出行牺牲量,符合实际情况,对预测城市出行方式划分提供了一种科学简便的解决方法。

(2)基于调查数据,考虑到各出行方式的安全性、舒适性和方便性,利用MD模型获得各个出行方式的惩罚因子取值,对城市交通出行方式划分预测具有一定的指导意义。

(3)通过分析城市道路平均服务水平、公交车拥挤服务水平、地铁拥挤服务水平对出行方式划分结构的影响,可确定城市出行方式划分的结构目标。预测划分比例与实际均值偏差不大,验证了模型的实用性。以预测西安市道路出行方式划分为算例,针对预测年公交车出行票价、地铁出行票价费用变量进行分析,得到了费用变量与出行方式划分结构之间的变化规律。

(4)根据预测年城市交通建设发展规划提倡的交通目标,可通过模型计算出新增交通方式的诱增交通量与方式划分结构,对城市综合交通规划与组织具有参考价值。

## 参考文献 References

- [1] ERKEN J. Generalized logit model[J]. Transportation Research, 1991, 25(2): 75-88.
- [2] 王秋平,王思颖. 基于城市交通网络的历史街区单向交通组织优化[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2014, 46(3): 342-347.

- WANG Qiuping, WANG Siying. One-way traffic organization optimization of the historic district based on urban traffic network[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech (Natural Science Edition), 2014, 46(3): 342-347.
- [3] 易富君,邓卫,周竹萍. 基于Nested-Logit模型的经济圈交通方式划分方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 4(8): 110-115.
- YI Fujun, DENG Wei, ZHOU Zhuping. Traffic modal splitting method for economic circle based on Nested-Logit Model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information technology, 2009, 4(8): 110-115.
- [4] REN Gang, ZHOU Zhuping, ZHANG Haoran. Application of discrete choice model in trip mode structure forecast: a case study of Bengbu [J]. Journal of Southeast University, 2011, 27(1).
- [5] 孙启鹏,朱磊,陈波. 基于动态广义费用的客运通道交通方式选择Logit模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(4): 15-22.
- SUN Qingpeng, ZHU Lei, CHEN Bo. A Dynamic Generalized Cost Based Logit Model for Passenger Corridors[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information technology, 2013, 13(4): 15-22.
- [6] 宋雪梅,蒋阳升,云亮. MD预测模型的计算方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 2(8): 65-70.
- SONG Xuemei, JIANG Yangsheng, YUN Liang. Study on the calculation method Of MD forecast mode [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 2(8): 65-70.
- [7] 彭辉,王洁. 运输通道新建高速铁路客运量预测MD模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 3(9): 93-97.
- PENG Hui, WANG Jie. MD forecasting model of passenger traffic volume for newly-built high-speed railway in transport corridor [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 3(9): 93-97.
- [8] 伍拾煤. 密集城镇群多层级轨道交通客流预测模型研究[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014, 1.
- WU Shimei. Research on passenger flow forecast model of multi-level rail transit in dense city group [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014, 1.
- [9] 叶臻,关宏志,周竹萍. 基于网络均衡的城市客运枢纽换乘需求研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 33(5): 538-544.
- YE Zhen, GUAN Zhihong, ZHOU Zhuping. Research on the transfer demand in urban public transportation terminal based on network equilibrium [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 33(5): 538-544.
- [10] 陈云. 居民收入分布及其变迁的统计研究[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2009.
- CHEN Yun. Statistical research on the resident income distribution and its changes [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2009.

(编辑 吴海西)