

考虑城市客运结构优化的城市轨道交通 定价方法研究

刘美银, 王建伟*

(长安大学 经济与管理学院, 西安 710061)

摘要: 票价直接影响乘客出行方式选择和城市客运结构。在比较交通方式相对优势度和影响因素的基础上, 以城市综合交通乘客出行时间最少, 整体系统结构优化为目标, 构建了城市客运系统整体出行时间最小的双层规划模型, 并进行算例分析, 验证模型的可操作性。算例表明, 调整城市轨道交通票价情况下, 随着票价降低, 选择城市公共汽车和私人小汽车出行客流转移到城市轨道交通, 城市轨道交通客流逐步增加, 整个系统广义出行成本降低, 系统总出行时间减少。城市客运系统结构中各交通方式优势的发挥受票价影响, 在城市轨道交通票价制定时, 应优先提高城市轨道交通客流量以增强客流分担率, 最大可能发挥其运能大和系统出行时间少的特点。

关键词: 城市交通; 城市轨道交通; 定价方法; 客运结构优化; 双层规划模型

Pricing Method of Urban Rail Transit Considering the Optimization of Passenger Transport Structure

LIU Mei-yin, WANG Jian-wei

(School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Fare directly affects the passenger travel mode choice and the structure of urban passenger transport. A bi-level programming model with the minimum travel time of the urban passenger transport system is constructed to optimize the overall structure of the system based on comparing the relative superiority degree and influence factors of each traffic mode. A numerical example is given to verify the operability of the model, which suggests that as the fare of urban rail transit lower, more passengers would choose the mode of urban rail transit instead of buses or private car. With the gradually increased of urban rail transit passenger flow, the generalized travel cost and the total travel time will be reduced. Due to the impact of the fare, how to increase the passenger flow should be primary considered to enhance the share rate of urban rail transit system and display its advantage of large capacity and short travel time when making the fare policy of urban rail transit system.

Keywords: urban traffic; urban rail transit; pricing method; optimization of passenger transport structure; bi-level programming model

0 引言

乘客每一次出行都是对多种类交通方式的选

择过程, 选择中不仅考虑交通方式的快速性、舒适性、经济性等因素, 还会考虑交通方式衔接的方便

收稿日期: 2017-02-13

修回日期: 2017-05-02

录用日期: 2017-05-09

作者简介: 刘美银(1969-), 男, 江西石城人, 博士生。

*通信作者: wjianwei@chd.edu.cn

性等因素,各交通方式的选择相互影响、相互制约,但实质上是乘客对各种交通方式相对优势的评价过程,相对优势将直接影响乘客的选择行为,优势明显的交通方式被乘客选择的可能性就越

大,不同交通方式的优势存在强弱差异,导致了各种交通方式客运承担率不同.城市综合交通系统内客流出行过程如图1所示.

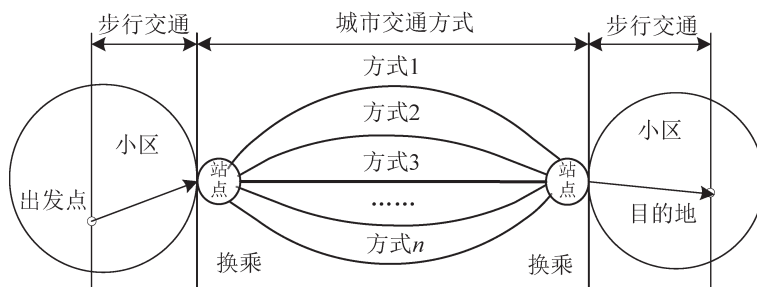


图1 城市综合交通系统内客流出行过程

Fig. 1 The process of passenger flow in urban comprehensive transportation system

近年来,许多学者关注乘客交通方式选择行为的影响和制约因素,毛保华^[1],杨明等^[2],李婧等^[3],沈未等^[4]考虑了传统意义的出行时间因素;Carlsson-Kanyama^[5],陆化普等^[6]也对交通方式能源消耗和环境容量制约等进行了重点关注,持续关注城市交通结构优化和可持续发展;林震等^[7]从城市综合交通乘客出行均衡角度建立了城市交通竞争微分方程和客运交通结构优化模型,并提出了发展策略.上述学者主要对城市轨道交通出行方式选择进行多因素分析,未对票价制定和客流结构优化进行专门研究.为此,在分析交通方式优势度影响因素的基础上,考虑城市客运结构优化和城市轨道交通发展财务可持续性,以乘客整体出行时间最少,构建了系统整体出行时间最小的双层规划模型,并进行案例分析,验证模型的可操作性.

1 优势度分析

1951年开始提出的优势度概念被广泛的应用在交通领域,很好地解释了人们出行选择交通方式行为.刘贤腾认为各种交通方式自身具备满足不同空间位移需求优势的差异会使乘客出行选择行为更加具有自主性^[8].李娅莉认为交通方式优势是综合利用自身技术、经济和运输组织等资源与安全性、舒适性、便利性等多种能力所形成^[9].但这些研究只给出相关概念,尚未明确给出交通方式优势度计算方法.基于Logit模型具有物理意义明确、便于计算特点^[10]和优势度定义,城市综合交通中各交通方式优势度可用快速、准时、舒适及安全

性等因素综合表示,并在此基础上分解这些因素的下一级影响因素.第*i*种交通方式优势度 F_i 、优势度分担率 $P(i)$ 如式(1)~式(3)所示.

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^K F_{ij,k} \quad (1)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^J \theta_j \cdot F_{ij} \quad (2)$$

$$P(i) = \frac{\exp\left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \theta_j \cdot F_{ij,k}\right)}{\sum_{i=1}^I \exp\left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \theta_j \cdot F_{ij,k}\right)} \quad (3)$$

式中: F_{ij} 表示第*i*种交通方式优势度受到第*j*种优势度因素影响; $F_{ij,k}$ 表示第*i*种交通方式优势度受到第*j*种影响因素的第*k*种子因素的计算内容影响; θ_j 表示第*i*种交通方式优势度的第*j*种优势度影响因素的权重;*J*表示优势度影响因素总和;*I*表示城市交通方式类别,为城市轨道交通、公共汽车、出租汽车及私人小汽车.

2 影响因素分析

优势度的因素采用主成分分析法和问卷调查提取,便于统一计算,因素计量均转化为费用处理.

(1) 时间性.

乘客完成一次从起点到终点目的地花在运输上的时间 T_i ,包括:两端的步行时间、等候时间、行驶时间(含换乘时间),如图2所示.出行时间消耗由式(4)表示.

$$T_i = T_{W0,i} + T_{wait,i} + T_{operation,i} + T_{WD,i} \quad (4)$$

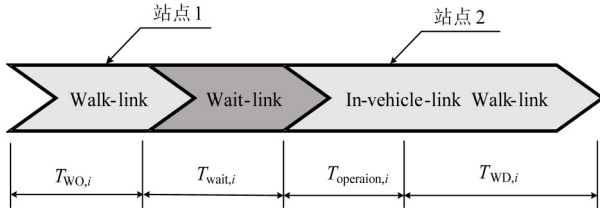


图2 乘客出行时间组成部分

Fig. 2 Passenger travel time component

① $T_{WO,i}$ 、 $L_{O,i}$ 和 $V_{O,i}$ 表示第*i*种交通方式出发到站点的步行时间、距离和速度; $T_{WD,i}$ 、 $L_{D,i}$ 和 $V_{D,i}$ 表示第*i*种交通方式最后到站点到目的地步行时间、距离和速度;私人小汽车和出租汽车步行时间取值为0.

$$T_{WO,i} = \frac{L_{O,i}}{V_{O,i}} \quad (5)$$

$$T_{WD,i} = \frac{L_{D,i}}{V_{D,i}} \quad (6)$$

② $T_{wait,i}$ 表示第*i*种交通方式在站点等待时间,依照De Cea等提出的公共交通等车时间,按照式(7)进行计算^[11]; f_m 和 δ 表示第*i*种交通方式的发车频率和到达时间的偏差.根据式(7)及相关经验,常规公共汽车出行时, $\delta = 0.707/f_m$;城市轨道交通的 $\delta = 0$,城市轨道交通延误率低,受出行环境影响极小.出租汽车为叫车服务,可认为没有等待时间,等效计算 $T_{wait,i}$.

$$T_{wait,i} = \frac{[(1/f_m)^2 + \delta^2]}{2/f_m} \quad (7)$$

$$T_{wait,i} = \begin{cases} (3/4)f_m, & i = \text{常规公交车} \\ (1/2)f_m, & i = \text{城市轨道交通} \\ 0, & i = \text{出租汽车} \\ 0, & i = \text{私人小汽车} \end{cases} \quad (8)$$

③ $T_{operation,i}$ 表示第*i*种交通方式在途运输时间消耗;车辆行驶时间和延误时间可作为在途运行时间,计算公式为

$$T_{operation,i,s} = \frac{L_{Operation,i,s}}{V_{operation,i,s}} \quad (9)$$

$$T_{operation,i} = \sum_{s=1}^S \frac{L_{Operation,i,s}}{V_{operation,i,s}} \quad (10)$$

式中: $T_{operation,i,s}$ 、 $L_{Operation,i,s}$ 和 $V_{operation,i,s}$ 表示乘客换乘第*s*次采用交通方式*i*运行时间、出行距离和平均运行速度.交叉口延误可取值为运行时间的8%~12%,城市轨道交通交叉口延误取值为0.

$$T_{operation,rail,s} = \frac{L_{Operation,rail,s}}{V_{operation,rail,s}} \quad (11)$$

$$T_{operation,bus,s} = 1.2 \cdot \frac{L_{Operation,bus,s}}{V_{operation,bus,s}} \quad (12)$$

$$T_{operation,taxi,s} = 1.1 \cdot \frac{L_{Operation,taxi,s}}{V_{operation,taxi,s}} \quad (13)$$

$$T_{operation,car,s} = 1.08 \cdot \frac{L_{Operation,car,s}}{V_{operation,car,s}} \quad (14)$$

(2) 经济性.

我国城市交通票价采用基础起步价,阶梯式增长的票价方式, $M_{i,s}$ 表示第*i*种交通方式在一次出行中第*s*段的出行费用(元).

$$M_{i,s} = \begin{cases} m_{basic}, & L_i \leq L_{basic} \\ m_{basic} + \xi_i(L_i - L_{basic}), & L_i > L_{basic} \end{cases} \quad (15)$$

式中: m_{basic} 和 L_{basic} 表示第*i*种交通方式起步价格(元)和起步距离(km); L_i 和 ξ_i 表示为第*i*种交通方式运行距离(km)和超出起步价格后单位公里价格(元/km).

私人小汽车满足个性出行,车主一般不关注折旧等,仅考虑维护费用和燃油费用等成本,私人小汽车单位出行费用 M_{car} 为

$$M_{car} = (H_{维修} + E_{燃油}) \cdot L_{car} \quad (16)$$

式中: $H_{维修}$ 和 $E_{燃油}$ 分别表示私人小汽车单位公里的维修和燃油消耗成本(元/km).

(3) 舒适性.

车内拥挤或者车里环境差都会影响交通方式的承载率,导致出行方式吸引力降低.依照沈景炎(2011)提出的站席密度标准,第*i*种交通方式第*s*段的拥挤费用 $U_{i,s}$ (元).

$$\varphi_{i,s} = \frac{Q_{i,s}}{G_{i,s}} \quad (17)$$

$$U_{i,s} = \varphi_{i,s} \cdot Y_{i,s} \cdot L_{i,s} \quad (18)$$

式中: $\varphi_{i,s}$ 表示第*i*种交通方式的第*s*段的拥挤系数; $Y_{i,s}$ 表示第*i*种交通方式的第*s*段的拥挤费率(元/km); $L_{i,s}$ 表示第*i*种交通方式第*s*段的距离(km); $Q_{i,s}$ 和 $G_{i,s}$ 分别表示第*i*种交通方式的第*s*段的站立客流量和车内(除去坐席及扶手的面积)额定载客量,可以调查获得平均值.

综上所述,依照式(2),可以得到第*i*种交通方式优势度 F_i 为

$$F_i = \theta_1 T_i + \theta_2 M_i + \theta_3 U_i \quad (19)$$

式中: θ_1 、 θ_2 、 θ_3 表示出行时间、经济成本等转化为费用的转化系数.

3 定价模型构建

乘客选择不同的城市交通方式直接影响城市综合交通结构,而交通方式的选择行为受出行时间和出行票价(费用)等因素影响.一旦交通方式建成后,出行时间就基本确定并相对稳定.出行费用主要受到票价制定政策影响,可以改变交通方式的出行成本,影响乘客出行行为选择和总体出行需求,可用双层规划模型进行描述.

$$\begin{aligned} \text{上层模型为 } & \min_x F(x, y(z)) \\ \text{s.t. } & G(x, y(x)) \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{下层模型为 } & \min_y f(x, y) \\ \text{s.t. } & g(x, y) \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

式中: F 是上层规划模型所确定的目标函数和决策变量; G 是对变量 x 的约束; f 为下层规划模型所确定的目标函数; y 为下层规划模型的决策变量; g 是对变量 y 的约束; $y(x)$ 是反应函数.

考虑到城市交通属于多方式、多路径的交通网络,可以通过 $G=(N, L)$ 表示,其中 N 为节点集, L 为路段集.因此,城市轨道交通、私人小汽车的运输路网分别定义为 $G_r=(N_r, L_r)$ 、 $G_a=(N_a, L_a)$ 及 $G_b=(N_b, L_b)$,而道路子网络中主要包括公共汽车、私人小汽车和出租汽车等交通运输方式, P_r^a 为道路子网络起讫点 r 、 s 的路径集; P_r^o 为轨道交通子网络起讫点 r 、 s 的路径集; Q_{rs} 为 r 、 s 之间的交通需求量.短时间内城市交通网络客运需求OD量保持稳定,即 Q_{rs} 需求量保持不变.

(1) 上层规划模型.

实现乘客出行效益最大化,使整个系统出行广义成本花费最小,不同交通方式出行的效益总体最大,上层规划模型以出行总成本最小为总体目标(即为所选交通方式客运量与运输花费成本之和的乘积最小).

$$\min Z = \sum_n \xi_i \cdot q_n(u_n) \cdot F_n \quad (22)$$

$$\text{s.t. } l \cdot q(u_i) \cdot u_i - q(u_i) \cdot E_r \geq 0, u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max} \quad (23)$$

式中: $q_n(u_n)$ 为第 n 种交通方式的客流量; F_n 为乘客选择第 n 种交通方式所具备的优势度; l 为城市轨道交通线路运营里程; u_n 为第 n 种交通方式的票价率, u_r 为城市轨道交通票价率; E_r 为城市轨道交通单位乘客运营成本; ξ_i 为第 i 种交通方式的权重,一般取1.

式(23)表示为城市轨道交通运营部门应当确保获得基本经济效益,以实现可持续经营,即运营收益应大于等于某设定运营成本值,同时也要考

虑到城市轨道交通票价率最低值限制,为保持竞争力,以及和公共汽车、出租汽车相比设定一个最高值.

(2) 下层规划模型.

乘客出行方式选择,主要依据对各种交通方式的感知效益进行判断,效益越高的交通方式,客运量被选择的可能性越高,最终各交通方式客流承担量逐步达到平衡.下层规划模型主要采用随机用户平衡模型:

$$\min_{a \in A} Z = \sum_k \sum_{rs} \int_0^{q_k^{rs}} C_k^{rs}(x) dx \quad (24)$$

$$\text{s.t. } \sum_k \sum_{rs} f_k^{rs} = q_k^{rs}, \forall k \in K^{rs}; f_k^{rs} \geq 0 \quad (25)$$

$$x_a = \sum_k \sum_{rs} f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad (26)$$

式中: Z 为固定需求用户均衡问题的目标函数; A 为网络所有路段的集合; a 为网络中的任意路段, x_a 为路段 a 的路段流量; $C_k^{rs}(x)$ 为起讫点 r 、 s 间第 k 条路径的广义费用(以出行时间和出行费用(主要为票价)表示),可表示为 $C_k^{rs}(x) = F_i = \theta_1 T_i + \theta_2 M_i + \theta_3 U_i$; N 为城市网络中节点集; f_k^{rs} 表示起讫点 r 、 s 间第 k 条路径的流量; q_k^{rs} 表示起讫点 r 、 s 间的总流量; $\delta_{a,k}^{rs}$ 表示起讫点 r 、 s 间第 k 条路径第 a 路段的系数.

4 模型求解

考虑到双层规划模型求解应采取迭代法,采用交通方式客流量 $q_n(u_n)$ 对城市轨道交通票价 u_r 的导数关系作为反应函数,即 $f(q, u)$ 可用泰勒展开式近似表示为

$$q_n(u_n) = q_n \cdot (u_n^{(0)}) + \frac{\partial q_n}{\partial u_n} \cdot (u_n - u_n^{(0)}) \quad (27)$$

将式(27)代入到上层规划目标函数,则上层规划问题可简化为普通的非线性优化问题.上层规划模型求最优解(即更新的城市轨道交通票价),以此结果求解下层规划模型,得出更新后的交通方式客流量,直到收敛为止.迭代步骤为:

Step 1 初始化模型参数.通过求解下层规划模型,给出各交通方式初始出行流量 $q_n(u_n)$,令迭代步数 $j=1$.

Step 2 用 $q_n(u_n)$ 求解上层规划模型.求出上层规划模型中最优出行比例 Q^j , l 为迭代步数.

Step 3 用 Q^j 求解下层规划模型.

Step 4 若满足收敛准则,则停止迭代;否则,

令 $j=j+1$, 转到 Step2.

下层规划模型逐步更新流量的算法步骤为:

Step 1 初始第 n 种交通方式初始路段流量 $\{x_a^n\}, n=1,2,3$, 初始票价率 $u_n^{(0)}$.

Step 2 更新各种交通方式的出行阻抗, 即各交通方式的出行时间. 计算乘客选择各运输方式作为出行方式的广义出行费用.

Step 3 按照全有全无原则配流, 得到各方式的均衡流量.

Step 4 确定迭代步长 a .

Step 5 更新流量, 即计算

$$x_a^{n(i+1)} = x_a^{ni} + a(y_a^{ni} - x_a^{ni}), \forall a, n = 1, 2, 3$$

$$q_{rs}^{n(i+1)} = q_{rs}^{ni} + a(\mu_{rs}^{ni} - q_{rs}^{ni}), \forall r, s, n = 1, 2, 3$$

Step 6 下层规划收敛检验, $q_{rs}^{n(i+1)} - q_{rs}^{ni} \leq 5\%$ 停止迭代; 否则, 令 $n=n+1$ 转至 Step2.

5 算例分析

以某城市交通网为例, 将其简化为3个节点 N_1, N_2, N_3 , 各节点间交通方式包括城市轨道交通、城市公共汽车、小汽车(出租汽车和私人小汽车)等3种方式. L_1 为城市轨道交通, L_2, L_3, L_4 为道路运输通道, 如图3所示.

为了简单起见, 假设私人小汽车和出租汽车统称小汽车, 参数取值相同, 通行能力为 2 400 veh/h, 城市公共汽车通行能力为 1 200 veh/h; 城市轨道交通设计输送能力为 1 336 人次/h; 其他参数属性值如表1和表2所示. 出行属性值作为模型初始输入值, 利用上述建立的双层规划模型, 可以得到不同票价下的客运结构、运营成本、运营收益及系统乘客总出行时间变化情况, 计算结果如表3、图4和图5所示.

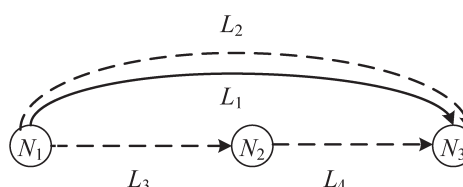


图3 城市交通网多交通方式交通网络抽象图
Fig. 3 Abstract graph of traffic network in a city traffic network

表1 城市内各交通方式 OD 需求量

Table 1 OD demand in urban transportation model

		(人/h)		
节点	N_1	N_2	N_3	
N_1	0	2 000	18 000	
N_2	2 000	0	3 000	
N_3	18 000	3 000	0	

表2 参数取值

Table 2 Parameter values

参数	城市轨道交通			小汽车			公共汽车					
	φ_r	v_r	u_r^0	l^r	M_r	v_B	u_B^0	φ_B	v_{Car}	u_{Car}^0	l_{Car}	φ_{Car}
取值	0.8	45 km/h	0.05 元/km	30 km	0.28 元/km	25 km/h	1 元/km	0.4	20 km/h	0.6 元/km	100 km	0.1

表3 不同城轨票价, 客流平衡时各交通方式选择结果

Table 3 Adjust the fare of urban rail transit, the network balance when the transport mode selection results

城市轨道交通 票价率/(元/km)	城轨交通系统收益和 成本差值/万元	系统总成本 花费/万元
0.45	20	120
0.46	25	128
0.47	25	135
0.48	9	142
0.49	4	143
0.50	9	144
0.51	10	146
0.52	10	147
0.53	10	148
0.54	10	148
0.55	11	149
0.56	11	149
0.57	11	150
0.58	11	150
0.59	10	150
0.60	10	150

从表3可以看出, 随着城市轨道交通票价下降, 轨道交通出行的广义出行费用降低, 城市轨道交通客流分担率逐步增加, 城市公共汽车客流分担率减少和私人小汽车的分担比例减少. 相比公共汽车方式, 城市轨道交通舒适性好, 随着城市轨道交通票价降低, 原公共汽车客流开始转移到城市轨道交通运输方式.

从图4和图5可以看出, 城市轨道交通票价率在 0.49 元/km 时, 运营收益与运营成本之间差值最小, 但是城市轨道交通载客量和系统总体成本不是最优的, 随着城市轨道交通票价增加, 运营收益增加, 运营收益和运营成本差值维持在相应稳定水平.

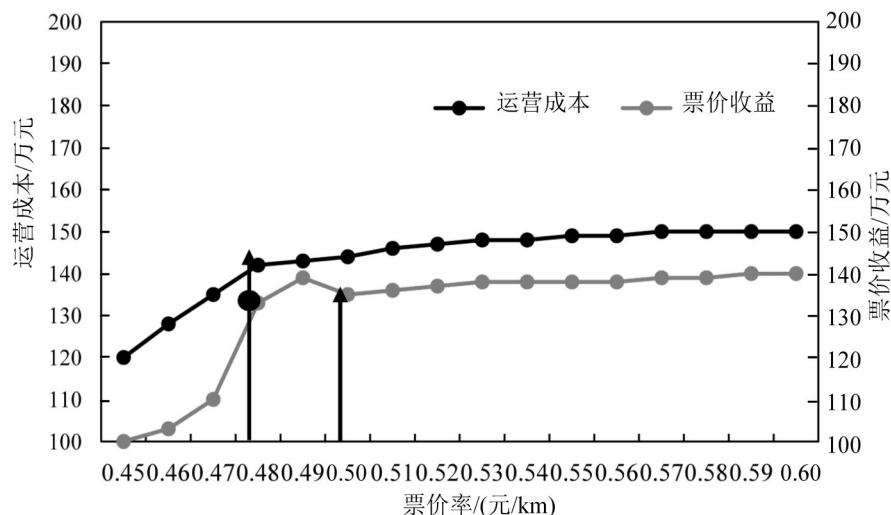


图4 城市轨道交通票价调整下运营成本及收益

Fig. 4 Operating costs and benefits of urban rail transit fare adjustment

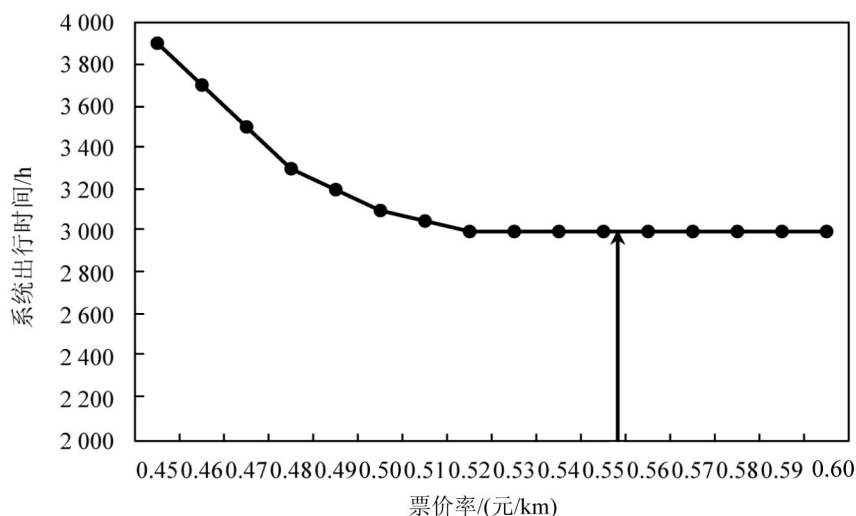


图5 城市轨道交通票价调整下系统出行时间

Fig. 5 The change of system travel time in urban rail transit fare adjustment

总体来看,随着城市轨道交通票价减少,由于城市轨道交通在出行时间方面相对其他方式更具有出行时间稳定优势,随着城市轨道交通客流增加,使整个交通系统的出行时间减少,系统收益最大.当城市轨道交通定价0.56元/km时,运营成本和收入差值最小,可以认为达到相对平衡.由图5所示,当制定优化城市轨道交通、私人小汽车、公共汽车客运结构目标为68.5:4.0:27.5时,综合考虑成本和收益的前提下,在维持城市轨道交通运营单位收支基本平衡条件下,票价率推荐为平均定价0.56元/km,系统总出行时间花费下降8.2%,有助于实现系统总出行时间最优,可以促进城市客运结构得到优化.

6 结论

结合我国城市内客运出行特点,充分考虑城市轨道交通、私人小汽车、城市公共汽车、出租汽车等交通方式的前提下,构建了城市客运系统出行时间最小,系统总体收益最大的双层规划模型,并提出了求解算法.研究表明:

(1) 城市轨道交通票价调整,直接影响各交通方式广义费用相对值,影响客流承担率,进而优化城市客运交通结构.随着票价降低,相对城市公共汽车和私人小汽车,城市轨道交通自身具有的舒适性和出行成本的优势度逐步显现,更多的客流转向城市轨道交通.

(2) 在城市轨道交通票价调整的情况下,随着

票价降低,城市公共汽车和私人小汽车出行客流转移选择城市轨道交通,城市轨道交通客流逐步增加,整个系统的广义出行成本降低,系统总出行时间减少.为优化整个客运系统结构,在城市轨道交通票价制定时,应充分提高城市轨道交通客流量,最大可能发挥其运能大和系统出行时间稳定的特点,不断增强城市轨道交通客流分担率.

(3) 在城市轨道交通票价调整的情况下,在考虑优化城市客运系统结构时,过多的减少票价,虽然能够提高客流量,但会影响城市轨道交通服务质量,也将急剧减少城市轨道交通运营收益,将会影响城市轨道交通运营单位财务可持续经营,也需要维持运输系统的运营成本和收益的平衡.

参考文献:

- [1] 毛保华. 城市综合交通结构演变的实证研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. [MAO B H. An empirical study on the evolution of urban comprehensive traffic structure[M]. Beijing: People's Transportation Publishing House, 2011.]
- [2] 杨明, 谢辉. 基于循环经济的城市客运交通结构优化模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006(12): 23-27. [YANG M, XIE H. The optimization model for urban passenger traffic structure based on recycling economy[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006(12): 23-27.]
- [3] 李婧, 谭清美, 白俊红. 可持续发展视角下城市交通结构优化模型研究[J]. 开发研究, 2009(3): 144-148. [LI J, TAN Q M, BAI J H. Study on optimization model of urban traffic structure in the perspective of sustainable development[J]. Development Research, 2009(3): 144-148.]
- [4] 沈未, 陆化普. 基于可持续发展的城市交通结构优化模型与应用[J]. 公路工程, 2005, 30(1): 150-153. [SHEN W, LU H P. A model of its application of transportation structure optimization based on urban sustainable development[J]. Highway Engineering, 2005, 30(1): 150-153.]
- [5] CARLSSON-KANYAMA A, L INDEN A. Travel patterns and environmental effects now and in the future: implications of differences in energy consumption among socio-economics groups[J]. Ecological Economics, 1999(30): 156-178.
- [6] 陆化普, 王建伟, 张鹏. 基于能源消耗的城市交通结构优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004(3): 383-386. [LU H P, WANG J W, ZHANG P. Urban transport structure optimization based on energy consumption[J]. Journal of Tsinghua University (Science And Technology), 2004(3): 383-386.]
- [7] 林震, 杨浩. 城市交通结构的优化模型分析[J]. 土木工程学报, 2005(5): 100-104. [LIN Z, YANG H. Optimization model analysis for urban transport structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2005(5): 100-104.]
- [8] 刘贤腾, 潘海啸. 提高公共交通竞争力的措施分析[J]. 城市规划学刊, 2000, 2(6): 44-49. [LIU X T, PAN H X. An analysis on measures to enhance the competitiveness of public transport[J]. Urban Planning Forum, 2000, 2(6): 44-49.]
- [9] 李娅莉, 朱晓海. 客运通道运输方式竞争力评价方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2008, 30(7): 14-16. [LI Y L, ZHU X H. Research on evaluation method of transport mode competitiveness of passenger transport corridor[J]. Railway Transport and Economy, 2008, 30(7): 14-16.]
- [10] 程先东. 多方式客运通道结构演变与发展研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. [CHEN X D. Structure evolution and development of multi-mode passenger transportation corridor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.]
- [11] DE CEA J, FERNANDEZ J E. Transit assignment to minimal routes: an efficient algorithm[J]. Traffic Engineering and Control, 1989(30): 491-494.