

文章编号:1671-6833(2020)03-0091-06

基于累积前景理论的组合出行交通分配模型

张雪妍, 贺 锋

(中国人民解放军军事科学院 国防工程研究院, 北京 100091)

摘 要: 城市交通网络是包含多种交通方式的不确定性复杂系统,出行者作为交通网络的直接参与者,对交通方式和路径的选择行为将直接影响交通网络的均衡状态。以累积前景理论为基础,在随机交通网络中,考虑出行者的观测误差和风险决策行为,分析了组合出行下的随机用户均衡条件,并建立了相应的变分不等式模型,根据变分不等式定理,分析了模型的等价性和解的存在性,采用基于路径的相继平均算法对问题进行求解。引入超级网络作为算例,对模型进行了验证,并对模型参数进行了敏感度分析。计算结果表明:基于累积前景理论的组合出行交通分配模型,能够更加有效地刻画出行者在不确定交通环境下的交通方式和换乘站点的选择行为,为城市交通方式划分和换乘站点选址等工作提供理论支持。

关键词: 交通运输工程; 累积前景理论; 组合出行模式; 交通分配; 相继平均算法

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.004

0 引言

随着城市交通出行方式的多样化,出行者的出行模式从单一的交通方式出行转变为多交通方式的组合出行,如停车换乘(P&R, park and ride)出行方式。相比单一出行方式,组合出行更能刻画出行者的实际出行行为。Fernández等最早建立了固定需求下的组合出行交通分配模型^[1],在此基础上,国内外学者进行了相应的扩展研究,主要包括混合交通分配模型^[2]、弹性交通分配模型^[3]、随机交通均衡分配模型^[4]和动态交通分配模型^[5]。这些组合出行模型与单一出行方式的模型相比,不仅能够分析出行者的广义路径选择行为,同时还能研究出行者的换乘站点选择行为,为网络换乘站点的规划提供理论支持。然而,上述研究均是在确定性网络中展开的,并没有考虑交通网络的不确定性。

交通系统是典型的不确定性系统^[6],比如受天气、交通事故的影响,路网通行能力将会衰减,考虑该种不确定性,孟梦等^[7]研究了降级路网下组合出行交通流分配模型与算法。但是除了交通系统的不确定性外,出行者本身还存在观测误差和非完全理性行为,因此并非所有出行者均会选

择实际费用最小的路径^[8]。累积前景理论是Tversky和Kahneman^[9]在一系列心理学实验基础上提出的,用于描述经济行为主体面临不确定条件时的决策行为过程。研究者们通过一系列实证调研,发现累积前景理论能够很好地描述出行者在不确定环境下的路径选择行为,并将其应用于交通网络分配和路径优化等问题^[10-11]。

为了定量分析随机组合网络中出行者的交通选择行为和网络均衡状态,在现有文献的基础上,引入累积前景理论,采用前景值描述出行者在不确定交通网络中的选择效用,基于随机效用理论分析了网络随机用户均衡条件,并建立了相应的变分不等式模型。该模型同时考虑了交通系统不确定性、组合出行方式、出行者观测误差和风险决策行为,可以更加精确地描述出行者的交通选择行为和网络均衡状态。

1 基本符号和理论

1.1 基本符号

定义交通网络 $G=(N,A)$, N 为节点的集合, A 为路段集合, W 为OD对集合。 R 和 D 分别代表城市道路路段集合和地铁路段集合,它们之间由换乘路段集合 E 进行连接, $R \cup D \cup E = A$ 。 M 为

收稿日期:2019-05-19;修订日期:2019-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61703351)

作者简介:张雪妍(1991—),女,辽宁沈阳人,中国人民解放军军事科学院工程师,主要从事交通运输规划与管理方面的研究,E-mail: 603110650@qq.com。

交通方式集合,包含小汽车和地铁两种方式,用 1 和 2 表示。 w 为一个 OD 对, q^w 为 OD 对 w 的出行需求, K^w 为 OD 对 w 的所有路径集合, f_k^w 为 OD 对 w 之间路径 $k \in K^w$ 的流量, x_a 为路段 a 上的流量, $\delta_{a,k}^w$ 为路段-路径关联变量,若路段 a 在路径 k 上则 $\delta_{a,k}^w = 1$, 否则 $\delta_{a,k}^w = 0$, T_a 为路段出行时间预算, T_k^w 为 OD 对 w 之间路径 k 的出行时间预算, v_k^w 为 OD 对 w 之间路径 $k \in K^w$ 的前景值。

1.2 累积前景理论

累积前景理论将风险的前景和不确定性因素纳入前景理论中,用决策权重函数替换决策概率值,分别考虑损失和收益,主要包含了 3 个基本观点:①收益和损失是相对于参考点而言的;②面对收益人们倾向于风险规避,面对损失人们倾向于风险偏好;③人们会高估小概率事件发生的可能,而低估大概率事件发生的概率。

在累积前景理论框架下,每条可行路径对应着相应的价值函数和决策权重函数,它们的乘积为路径前景值。根据累积前景理论,出行者将路径的前景值作为路径选择依据。计算路径的前景值,需要 3 个基本要素,分别为路径的价值函数、参照点和决策权重函数。

(1) 路径的价值函数与参照点密切相关,可以由下式表示:

$$g(T_k^w) = \begin{cases} (u^w - T_k^w)^m, & T_k^w \leq u_0; \\ -\lambda (T_k^w - u^w)^n, & T_k^w > u_0, \end{cases} \quad (1)$$

式中:参数 $m > 0, n \leq 1$, 表示出行者对价值收益和损失的敏感程度; $\lambda \geq 1$ 表示出行者对损失的规避系数; u^w 为参照点。

(2) 采用内生的方式确定参考点^[12], 即该 OD 对所有路径中出行时间预算的最小值:

$$u_0^w = \min_{k \in K^w} \{T_k^w\}. \quad (2)$$

(3) 为了确保权重函数是关于到达概率的单调递增函数,采用 Prelec 给出决策权重函数的形式^[13]:

$$w(p) = \exp[-(-\ln p)^\gamma], 0 < \gamma < 1. \quad (3)$$

沿用 Connors 的推导过程^[14], 令 $F(T_k^w)$ 为 T_k^w 的概率分布函数,从而得到路径的前景值为:

$$v_k^w = \int_{u_0^w}^{\bar{u}_k^w} \frac{dw[F(T_k^w)]}{dT_k^w} g(T_k^w) dT_k^w + \int_{u_0^w}^{\bar{u}_k^w} -\frac{dw[1 - F(T_k^w)]}{dT_k^w} g(T_k^w) dT_k^w, \quad (4)$$

式中: \bar{u}_k^w 和 u_0^w 分别为出行时间预算的下界和上界,上下界的取值会对前景值的计算造成影响,比

较合理的取值方法为: u_k^w 为路径自由出行时间, $\bar{u}_k^w = E(T_k^w) + 3\sqrt{\text{var}(T_k^w)}$ 。

2 模型建立

2.1 路径出行时间预算

小汽车网络路段出行时间采用 BPR (Bureau of Public Road) 函数,即

$$T_a(x_a, C_a) = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right], \forall a \in R, \quad (5)$$

式中: t_a^0 为路段自由走行时间; x_a 为路段流量; C_a 为路段实际通行能力; α 和 β 为参数,通常取 $\alpha = 0.15, \beta = 4$ 。

降级路网条件下,路段通行能力会在外部条件干扰下衰减,此时 C_a 为一个变量。令 C_a 服从 $[\theta_a \bar{C}_a, \bar{C}_a]$ 上的均匀分布,其中 \bar{C}_a 为路段 a 的设计通行能力, θ_a 为其通行能力的降级系数。经推导,可以得到小汽车网络路段出行时间的均值和方差^[15], 分别为:

$$E(T_a) = t_a^0 + \alpha t_a^0 x_a^\beta \frac{1 - \theta_a^{1-\beta}}{\bar{C}_a^\beta (1 - \theta_a)(1 - \beta)}, \forall a \in R; \quad (6)$$

$$\text{var}(T_a) = \alpha^2 (t_a^0)^2 x_a^{2\beta} \left\{ \frac{1 - \theta_a^{1-2\beta}}{\bar{C}_a^{2\beta} (1 - \theta_a)(1 - 2\beta)} - \left[\frac{1 - \theta_a^{1-\beta}}{\bar{C}_a^\beta (1 - \theta_a)(1 - \beta)} \right]^2 \right\}, \forall a \in R. \quad (7)$$

换乘时间通常由步行时间和等待时间组成。步行时间由换乘点到地铁站点的距离 $l_a, a \in E$ 和步行速度 v_{walk} 决定,等待时间与发车间隔 t_f 相关,假设其服从 $[0, t_f]$ 的均匀分布。则换乘时间的均值和方差为:

$$E(T_a) = \frac{l_a}{v_{\text{walk}}} + \frac{t_f}{2}, \forall a \in E; \quad (8)$$

$$\text{var}(T_a) = \frac{(t_f)^2}{12}, \forall a \in E. \quad (9)$$

地铁运行时间相对比较平稳,几乎不受路段上流量的影响,因此可假设地铁网络的路段出行时间为一个常数定值 $T_a, a \in D$ 。

假设路段出行时间相互独立,根据中心极限定理,路径的出行时间总是服从正态分布,则路径 k 的均值和方差为:

$$E(T_k^w) = \sum_{a \in R} \delta_{a,k} E(T_a) + \sum_{a \in E} \delta_{a,k} E(T_a) + \sum_{a \in D} \delta_{a,k} T_a; \quad (10)$$

$$\text{var}(T_k^w) = \sum_{a \in R} \delta_{a,k} \text{var}(T_a) + \sum_{a \in E} \delta_{a,k} \text{var}(T_a). \quad (11)$$

若给定到达概率 p , 则路径 k 的出行时间预算为:

$$T_k^w = E(T_k^w) + \sqrt{\text{var}(T_k^w)} \cdot \Phi^{-1}(p), \quad (12)$$

式中: $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布反函数。

2.2 随机用户均衡条件

考虑出行者的观测误差, 则出行者的感知路径前景值为一个随机变量, 它由实际前景值 v_k^w 和一个随机误差项 ε_k^w 组成:

$$\tilde{v}_k^w = v_k^w + \varepsilon_k^w \quad (13)$$

假设观测误差项服从独立同 Gumbel 分布, 根据随机效用理论, 选择路径 k 的概率为

$$P_k^w = \frac{\exp(\theta v_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(\theta v_k^w)}, \quad \forall k \in K^w, w \in W, \quad (14)$$

式中: $\theta > 0$, 为参数, 反映出行者对路网的熟悉程度。

根据网络均衡条件, 达到随机用户均衡状态时应满足如下条件:

$$f_k^w = P_k^w \cdot q^w; \quad (15)$$

$$\text{s.t. } q^w = \sum_{k \in K^w} f_k^w; \quad (16)$$

$$f_k^w \geq 0; \quad (17)$$

$$q^w \geq 0; \quad (18)$$

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K^w} f_k^w \delta_{a,k}^w \quad (19)$$

式(15)为随机用户均衡条件, 式(16)为流量守恒约束, 式(17~18)为流量非负约束, 式(19)为路径-路段流量关系。

2.3 变分不等式模型

将随机用户均衡条件转化为等价的变分不等式模型, 对模型解的存在性和等价性进行证明。

首先定义期望最小费用^[16], 其表达式为:

$$S(v^w) = \frac{1}{\theta} \ln \sum_{k \in K^w} \exp(\theta v_k^w). \quad (20)$$

令 Ω 为所有可行路径流量集 f 的集合, 随机用户均衡模型的解等价于寻找一个可行的路径流量集 $f^* \in \Omega$, 使得 $\forall f_k^{w*} \in f^*$ 满足如下变分不等式:

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K^w} \left[S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w \right] \times (f_k^w - f_k^{w*}) \geq 0. \quad (21)$$

(1) 等价性证明。根据变分不等式定理, 变分不等式等价于如下的互补松弛条件:

$$\left[S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w \right] \times f_k^{w*} = 0, \quad (22)$$

$$\left[S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w \right] \geq 0, \quad (23)$$

$$f_k^{w*} \geq 0, \quad \forall k \in K^w, w \in W. \quad (24)$$

当 $f_k^{w*} > 0$ 时, 由上式(22~24)可知:

$$S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w = 0. \quad (25)$$

对式(25)进行等价变换, 即可得到:

$$f_k^{w*} = \frac{\exp(\theta v_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(\theta v_k^w)} \cdot q^w. \quad (26)$$

不难看出, 式(26)等价于随机用户均衡条件, 从而得证变分不等式模型(21)等价于随机用户均衡条件(14~19)。

(2) 存在性证明。由约束条件(16~19)可知, 可行路径集 Ω 是由一系列线性约束构成, 因此为紧致凸集, 由式(12)和式(20)可知 v_k^w 和 $S(v^w)$ 是关于 f_k^w 的连续函数, 从而 $S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w$ 是关于 f_k^w 的连续函数, 根据变分不等式定理^[17], 模型至少存在一个解。

3 求解算法

如前文所述, 出行者将路径的前景值作为路径选择依据, 采用基于路径的相继平均算法 MSA 对模型进行求解, 其具体步骤如下:

step 0 初始化: 设定有效路径集合 K^w , 初始化参数, 计算路径初始时间预算 T_k^w 和前景值 v_k^w , 采用式(26)对交通需求 q^w 在路网上进行随机用户均衡加载, 得到路径初始流量 $f_k^{w(1)}$ 和初始路段流量 $x_a^1, n = 1$;

step 1 更新路径前景值: 根据路段流量, 由式(6)~(12)更新路径出行时间, 再由式(1)~(4)更新路径前景值 v_k^w ;

step 2 确定方向: 基于路径前景值 v_k^w , 对交通需求 q^w 在路网上进行随机用户均衡加载, 得到辅助路径流量 $\bar{f}_k^{w(n)}$, 得到路径流量更新方向 $\bar{f}_k^{w(n)} - f_k^{w(n)}$;

step 3 更新路径和路段流量: $f_k^{w(n+1)} = f_k^{w(n)} + a_n (\bar{f}_k^{w(n)} - f_k^{w(n)})$, $a_n = \frac{1}{n}$, 由路径路段关联矩阵得到路段流量 x_a^{n+1} ;

step 4 收敛检验:

$$\text{当 } \frac{\sqrt{\sum_w \sum_k (f_k^{w(n+1)} - f_k^{w(n)})^2}}{\sum_w \sum_k f_k^{w(n)}} \leq 10^{-3}, \text{ 算法}$$

结束,否则 $n = n + 1$,返回第一步。

4 算例

引入“超级网络”的概念^[18],将交通网络表达为包含多个交通方式子网络的超级网络,同时
在各子网络节点间添加虚拟弧段表示交通方式之间的换乘。图 1 展示了一个传统网络转换为超级网络的过程。

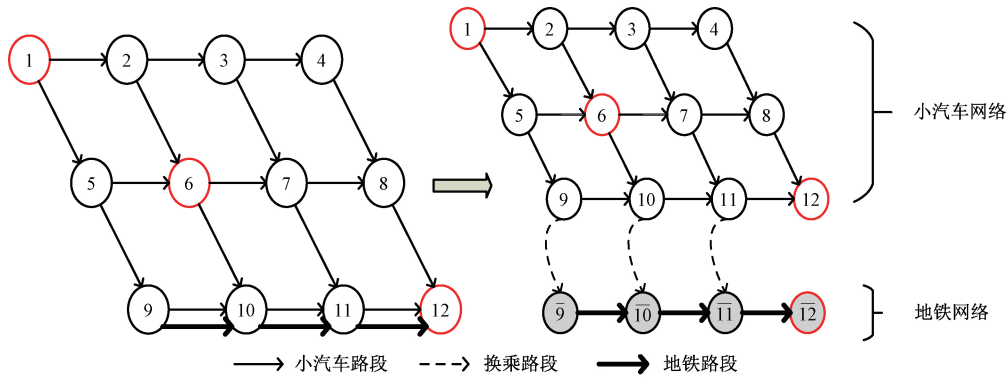


图 1 超级网络
Figure 1 Super network

如图 1 所示,网络中包含小汽车网络和地铁网络两个子网络,包含 16 个节点,共两个 OD 对
(1,12)和(6,12),它们的交通需求分别为 $q^1 = 1\,500\text{ pcu/h}$, $q^2 = 1\,200\text{ pcu/h}$ 。网络中共 23 条路段,其中 17 条小汽车网络路段,3 条换乘路段($9 \rightarrow \bar{9}$, $10 \rightarrow \bar{10}$, $11 \rightarrow \bar{11}$)和 3 条地铁路段($\bar{9} \rightarrow \bar{10}$,
 $\bar{10} \rightarrow \bar{11}$, $\bar{11} \rightarrow \bar{12}$)。小汽车网络、换乘网络和地铁网络的路段参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 小汽车网络路段参数

Table 1 Parameters for links in network of cars							
编号	路段	t_a^0/min	$\bar{C}_a/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	编号	路段	t_a^0/min	$\bar{C}_a/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$
1	1→2	14	900	10	7→8	14	900
2	2→3	15	800	11	5→9	20	700
3	3→4	14	900	12	6→10	20	700
4	1→5	20	700	13	7→11	17	1 000
5	2→6	17	700	14	8→12	16	900
6	3→7	15	1 000	15	9→10	14	800
7	4→8	17	900	16	10→11	13	900
8	5→6	16	800	17	11→12	12	900
9	6→7	15	600				

对于组合出行下的分配结果,相比路径流量,本文更加关注每个 OD 对中选择小汽车出行和换乘出行的流量,以及每个换乘站点的流量。下面将分析参数变化对均衡条件下出行者交通选择行为的影响。

现实中,根据地铁站和出行者目的地位置,可能会出现两种情况:(1) 地铁出行不能直接到达目的地,这时节点 $\bar{12}$ 和节点 12 位置不一致,两节点之间需添加一段步行弧;(2) 地铁出行能直接到达目的地,即节点 $\bar{12}$ 和节点 12 位置一致。沿用前人研究中网络的设置方法^[2-4],本文考虑第二种情况,采用图 1 网络进行算例分析。

表 2 换乘和地铁网络路段参数

编号	换乘 路段	$l_a/$ m	$v_{\text{walk}}/$ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	$t_f/$ min	编号	地铁 路段	$t_a^0/$ min
18	$9\rightarrow\overline{9}$	300	60	6	21	$\overline{9}\rightarrow\overline{10}$	14
19	$10\rightarrow\overline{10}$	300	60	6	22	$\overline{10}\rightarrow\overline{11}$	14
20	$11\rightarrow\overline{11}$	300	60	6	23	$\overline{11}\rightarrow\overline{12}$	14

(1)路网降级程度和到达概率。其他参数的设置情况为,路径价值函数(1)中 $m = n = 0.88$, $\lambda = 2.25$,决策权重函数(3)中 $\gamma = 0.74$ 。同时对到达概率和通行能力降级系数进行参数敏感性分析。设置高中低 3 种到达概率,分别对应 $p = 0.8$, $p = 0.5$, $p = 0.3$ 3 种情况;设置高中低 3 种通行能力降级系数,分别对应 $\theta_a = 0.8$, $\theta_a = 0.7$, $\theta_a = 0.6$, $a \in R$,综合下来,共 9 种情形。其结果如表 3 所示。

由表 3 可知,随着路网降级程度越严重,选择 P&R 出行方式的出行者越多,这是因为随着 θ_a 的减小,小汽车网络出行费用均值和方差都将变大。此外,出行者更加倾向于选择离终点较远的地铁站点进行换乘,这是因为出行者换乘距离越长,获得地铁出行费用稳定性的优势越大。

此外,随着到达概率增加,选择 P&R 出行方式的出行者会增多,但并不显著。由式(2)和

表 3 不同参数下出行选择结果

Table 3 Results of travel mode under different parameters

θ_a	p	OD1					OD2			
		小汽车 方式	P&R 方式	节点 9 换乘	节点 10 换乘	节点 11 换乘	小汽车 方式	P&R 方式	节点 10 换乘	节点 11 换乘
0.8	0.3	1 220	280	121	97	62	981	219	144	76
	0.5	1 216	284	120	100	64	976	224	141	83
	0.8	1 210	290	115	102	73	967	233	141	93
0.7	0.3	1 138	362	160	123	80	921	279	177	102
	0.5	1 125	375	161	129	85	918	282	174	108
	0.8	1 114	386	155	134	98	909	291	169	121
0.6	0.3	1 052	448	201	144	104	849	351	216	135
	0.5	1 036	464	201	151	112	847	353	210	143
	0.8	1 028	472	193	156	123	837	363	205	158

(12)可知,参照点会随到达概率 p 的取值变化而不同,对比参考文献[12]中累积前景理论下出行者的路径选择行为,出行者交通方式和换乘节点的选择行为参考点依赖效应并不显著。

(2)收益和损失的敏感性 m 和 n 。令 $p = 0.8, \theta_a = 0.7, \lambda = 2.25$,其他参数固定不变。设置 $m = n$,取值由低到高为0.4、0.5、0.6、0.7、0.8和0.88。由表4可知,出行者对于收益和损失的敏感性,对出行模式选择具有一定影响,且OD间距离(即OD2)越小,影响越大,其具体表现为:出行者对收益和损失越敏感,那么两种出行方式中,流量大的将越大,流量小的将越小。

表 4 不同 m 和 n 下的交通方式选择结果

Table 4 Results of mode choice with variation of m and n

$m = n$	OD1		OD2	
	CAR	P&R	CAR	P&R
0.40	1 089	411	779	421
0.50	1 097	403	798	402
0.60	1 102	398	816	384
0.70	1 104	396	834	366
0.80	1 106	394	850	350
0.88	1 106	394	864	336

(3)出行者损失规避程度 λ 。令 $p = 0.8, \theta_a = 0.7, m = n = 0.88$,其他参数固定不变。设置 λ 取值由低到高为1、1.25、1.5、1.75、2和2.25。由表5可知,出行者损失规避程度对于出行模式选择影响程度较弱,但从中也能发现:出行者损失规避程度越大,两种出行方式中,流量大的将越大,流量小的将越小,这与出行者对于收益和损失的敏感性参数分析结论是一致的。

综上所述,累积前景理论框架下出行方式的选择规律,与现有文献中路径选择规律有着一定的相似性,这是因为出行方式选择是广义路径选

表 5 不同 λ 下的交通方式选择结果

Table 5 Results of mode choice with variation of λ

λ	OD1		OD2	
	CAR	P&R	CAR	P&R
1.00	1 093	407	847	353
1.25	1 098	402	851	349
1.50	1 101	399	855	345
1.75	1 104	396	858	342
2.00	1 105	395	861	339
2.25	1 106	394	864	336

择的集计过程。此外,组合交通出行模型还能够辨析出行者的交通方式和换乘节点的选择行为,比单一交通出行模型具有更广泛的应用价值。

5 结论

对组合出行网络交通分配模型和算法进行了研究。为了考虑不确定环境下,组合出行网络中出行者的观测误差和风险决策行为,基于累积前景理论和随机用户均衡条件,构建了相应的变分不等式模型,对模型解的存在性和等价性进行了分析,并提出了求解算法。最后通过构建包含小汽车网络和地铁网络的超级网络作为算例,对模型的参数进行了敏感度分析。算例结果表明:模型能够有效地描述出行者的交通方式和换乘站点的选择行为,此外,路网降级系数和出行者风险态度均会影响网络的均衡分配结果。本文的研究工作为城市多模式交通规划提供了理论支持,能够应用到交通方式划分,停车换乘选址及停车场容量规划等工作中。

参考文献:

[1] FERNANDEZ E, DE CAE J, FLORIAN M, et al.

- Network equilibrium models with combined modes [J]. *Transportation science*, 1994, 28(3): 182–192.
- [2] 黄海军, 李志纯. 组合出行方式下的混合均衡分配模型及求解算法[J]. *系统科学与数学*, 2006, 26(3): 352–361.
- [3] 李志纯, 黄海军. 弹性需求下的组合出行模型与求解算法[J]. *中国公路学报*, 2005, 18(3): 94–98.
- [4] 李先进, 张国平, 张杰, 等. 组合出行模式下的随机交通平衡分配模型及算法[C]//第 25 届中国控制与决策会议论文集. 沈阳: 控制与决策编辑部, 2013.
- [5] 孟梦, 邵春福, 曾靖静, 等. 考虑出发时间的组合出行动态路径选择模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(10): 3676–3684.
- [6] 马庚华, 杜牧青, 张小丽. 不确定因素下的综合运输网络容量可靠性分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2018, 39(1): 1–6.
- [7] 孟梦, 邵春福, 曾靖静, 等. 降级路网组合出行交通流分配模型与算法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(2): 643–649.
- [8] SIMON H A. A behavioral model of rational choice [J]. *Competition policy international*, 2010, 6(1): 241–258.
- [9] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty [J]. *Journal of risk and uncertainty*, 1992, 5(4): 297–323.
- [10] 潘晓锋, 左志, 赵胜川. 基于前景理论的改进多路径交通分配模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(2): 162–167.
- [11] 崔岩, 张子祥, 时新, 等. 考虑顾客时间紧迫的生鲜电商配送路径优化问题[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2017, 38(6): 59–63.
- [12] XU H L, LOU Y Y, YIN Y F, et al. A prospect-based user equilibrium model with endogenous reference points and its application in congestion pricing [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2011, 45(2): 311–328.
- [13] PRELEC D. The probability weighting function [J]. *Econometrica*, 1998, 66(3): 497–527.
- [14] CONNORS R D, SUMALEE A. A network equilibrium model with travellers' perception of stochastic travel times [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2009, 43(6): 614–624.
- [15] SUN C, CHENG L, ZHU S L, et al. Multiclass stochastic user equilibrium model with elastic demand: considering systematic and accidental delays [J]. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, 2015 (2497): 1–11.
- [16] SHEFFI Y. *Urban transportation networks equilibrium analysis with mathematical programming methods* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [17] XIE C, WANG T G, PU X T, et al. Path-constrained traffic assignment: modeling and computing network impacts of stochastic range anxiety [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2017, 103: 136–157.
- [18] LIAO F X, ARENTZE T, TIMMERMAN H. Application of supernetworks in modelling activity-travel behavior [J]. *Journal of the university of Shanghai for science and technology*, 2011, 33(3): 279–286.

Traffic Assignment Model with Combined Modes Based on Cumulative Prospect Theory

ZHANG Xueyan, HE Feng

(Institute of National Defense Engineering, PLA Academy of Military Science, Beijing 100091, China)

Abstract: The urban transportation network was an uncertain complex system with multiple traffic modes. Being the direct participants, travelers made choices of traffic modes and travel paths, which could affect the equilibrium state of transportation network. Based on cumulative prospect theory, travelers' perceived errors and risk-decision behavior were considered in the stochastic transportation network. The stochastic user equilibrium condition with combined modes were analyzed and the corresponding variational inequality model was proposed, and the equivalence of model and the existence of solutions were also analyzed. A path-based method of successive average algorithm was used to solve this problem. A super network was introduced as the example network to verify the proposed model and sensitive analysis of the input parameters was made. The results showed that, based on cumulative prospect theory, the traffic assignment model with combined modes could more effectively describe the travelers' choosing behaviors of traffic modes and transfer stations in uncertain transportation environment. This study could provide theoretical support to the urban traffic mode split and site selection of transfer stations.

Key words: traffic and transportation engineering; cumulative prospect theory; combined modes; traffic assignment; method of successive average