

基于内生参考点的交通网络均衡模型*

王伟, 孙会君

(北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室,北京 100044)

摘要: 应用累积前景理论研究随机交通网络中出行者有限理性的路径选择行为,选择期望-超额出行时间作为参考点,反映出行者同时考虑出行时间的可靠性和不可靠性,建立了基于累积前景理论的随机网络均衡及其等价的变分不等式模型,运用基于连续平均法的启发式算法求解,并给出算例验证了该模型和算法,最后分析了有限理性的假设和内生的参考点对出行者路径选择行为和随机网络均衡的影响。

关键词: 累积前景理论; 内生参考点; 路径选择; 网络均衡; 有限理性

中图分类号: U491 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.02.009

引 言

随机的交通需求,随机的道路通行能力和出行者动态的选择行为等因素决定了现实中的交通网络是随机网络.许多学者都是基于期望效用理论(expected utility theory, EUT)和随机效用理论(random utility theory, RUT)研究随机情景下的出行者路径选择行为和网络均衡问题.众所周知,基于上述理论的网络均衡模型通常假设用户对交通网络具有完美信息,用户在选择路径时具有完全理性.但是,在实际中,完全理性的假设一般是不满足的.在交通领域,很多现象和实验数据都无法用基于完全理性的期望效用理论或随机效用理论来解释^[1-3],很多研究者对出行者的完全理性假设进行了批判^[4-5].

为了克服期望效用理论和随机效用理论的缺陷,基于有限理性假设的前景理论(prospect theory, PT)^[6]和累积前景理论(cumulative prospect theory, CPT)^[7]被不少学者应用于交通领域研究出行者的交通行为. Avineri 和 Prashker^[1-2]认为无法用期望效用理论解释的交通现象和行为可以很好地用累积前景理论来解释. Michea 和 Polak^[8]研究了出行者在不同行为框架下的决策,认为累积前景理论模型比期望效用理论模型更适合. Gao 等^[9]分别基于累积前景理论和期望效用理论研究了风险网络中用户的出行行为,得出前者是比后者更好地决策框架的结论. Xu 等^[10]也通过研究发现相对于期望效用理论和随机效用理论而言,出行者的路径选择决

* 收稿日期: 2012-10-25; 修订日期: 2012-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB725400);国家自然科学基金资助项目(71271023);中央高校基本科研业务费资助项目(2012JBZ005;2011YJS236);国家自然科学基金国际交流与合作资助项目(71210001);北京市科技新星计划资助项目(2009A15)

作者简介: 王伟(1985—),男,湖北黄冈人,博士生(E-mail: 10114223@bjtu.edu.cn);
孙会君(1974—),女,河北衡水人,教授,博士,博士生导师(通讯作者.E-mail: hjsun1@bjtu.edu.cn).

策规律与前景理论的结论更加吻合,出行者是极大累积前景效用的追求者。

在运用累积前景理论研究网络均衡问题方面,Avineri^[11]最早在随机交通网络均衡问题研究中应用了累积前景理论.Connors和Sumalee^[12]在路径走行时间为连续随机变量的假设下,提出了一般网络中的基于累积前景理论的用户均衡模型.Sumalee等^[13]研究了需求和能力双不确定的交通网络中的基于累积前景理论的网络均衡模型.Xu等^[14]基于累积前景理论建立了随机交通网络中的多用户均衡模型。

在累积前景理论中,参考点(reference point, RP)是一个重要的参数.参考点的选取对于基于累积前景理论的网络均衡模型有非常重要的影响.在以往的研究中,参考点主要分为外生和内生两类.外生的参考点通常是一个固定值,一般选取出行者的平均经验时间^[11-13].内生的参考点是一个变量,取决于交通网络的状态.Gao等^[9]认为参考点应该是根据不同的情形而变动的,并且每个人的参考点应该是不一样的.Xu等^[14]提出内生的参考点比外生的参考点更符合实际,并选取出行时间预算(travel time budget, TTB)作为参考点研究累积前景理论框架下用户的路径选择行为。

但是,出行时间预算仅考虑了用户选择路径时“可靠性”的一面,忽视了其“不可靠性”的一面.例如,出行者以可靠度 ρ 选择某条路径,意味着出行者以 ρ 的概率在出行时间预算内到达,但同时也有 $1 - \rho$ 的概率不能在出行时间预算内到达.研究表明,出行者不仅关心出行的“可靠性”,同时也关注出行的“不可靠性”.在此基础上,Chen和Zhou等^[15]提出了期望-超额出行时间的概念(mean-excess travel time, METT),并将其作为出行者选择路径的依据,反映出出行者在选择路径时对“可靠性”和“不可靠性”两个方面的关注.因此,在内生参考点的选择中,同时考虑“可靠性”和“不可靠性”两个方面才能更加全面、真实、准确地反映出出行者的风险偏好、心理期待和路径选择行为.本文选取期望-超额出行时间作为参考点,研究出行者基于出行前景值(prospect value, PV)最大化的路径选择行为和随机交通网络均衡问题,分析有限理性的假设和内生的参考点对用户路径选择行为和网络均衡的影响,对基于有限理性的累积前景理论在交通出行行为中的应用进行了更深入地研究。

1 累积前景理论

相对于期望效用理论,前景理论和累积前景理论的主要完善之处在于分获得和损失两种情况对行为主体的风险决策进行描述.基于行为主体有限理性的假设,前景理论和累积前景理论都有3个基本观点:

- 1) 收益和损失是相对于参考点 x_0 而言的;
- 2) 面对“收益($\Delta x \geq 0$)”,决策者倾向于风险规避,面对“损失($\Delta x < 0$)”,决策者倾向于风险喜好,决策者对损失的规避程度往往大于对相同收益的喜好程度;
- 3) 决策者会过于重视极端的小概率事件,而忽视常见的中大概率事件。

前景理论和累积前景理论的决策体系中主要包括价值函数、决策权重函数和前景值的计算公式。

1.1 价值函数

在前景理论和累积前景理论中,一个经典的价值函数形式如下^[6]:

$$\varphi(x) = \begin{cases} (x - x_0)^\alpha, & x \geq x_0, \\ -\eta(x_0 - x)^\beta, & x < x_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_0 表示参考点, 参数 $0 < \alpha, \beta < 1$, 表明在收益时决策者是风险厌恶的, 在损失时决策者是风险喜好的, 参数 α 和 β 还表示价值函数的边际递减性. 参数 $\eta (\eta \geq 1)$ 为损失规避系数, 表示人们对损失比对相同的收益更敏感. 价值函数反映上述基本观点 1) 和 2).

1.2 决策权重函数

前景理论和累积前景理论的区别主要在于对决策权重函数的处理上. 相比较于前景理论, 累积前景理论中的权重函数更具有通用性, 因此累积前景理论的应用更为广泛. 在累积前景理论中, 一个典型的权重函数形式如下^[12-13]:

$$w(p) = \exp(-(-\ln p)^\gamma), \quad (2)$$

其中, $w(p)$ 和 p 分别表示感知概率和实际概率, γ 为参数, 并且 $0 < \gamma \leq 1$, 表明决策者对小概率事件是高估的, 对中大概率事件是低估的. 权重函数反映上述基本观点 3). 价值函数和决策权重函数的形状如图 1 和图 2 所示.

1.3 前景值的计算

累积前景理论的前景值度量体系最先是针对离散选择的情形^[7], 有学者将其推广到连续选择的情形^[12]. 以连续选择决策的方案 X 为例, 其累积前景值的计算公式为

$$U(X) = \int_{-\infty}^{x_0} \frac{dw(F(x))}{dx} \varphi(x) dx + \int_{x_0}^{+\infty} -\frac{dw(1-F(x))}{dx} \varphi(x) dx, \quad (3)$$

其中, $U(X)$ 表示 X 的累积前景值, $F(x)$ 表示 X 的累积分布函数.

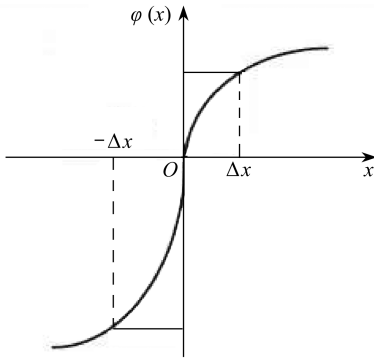


图 1 价值函数

Fig. 1 Value function

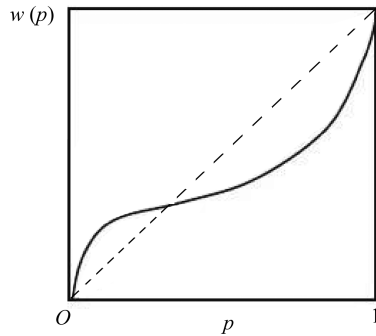


图 2 权重函数

Fig. 2 Weighting function

2 基于累积前景理论的路径选择决策

定义一个交通网络 $G = (N, A)$, 其中 N 是节点集合, A 是路段集合. 令 v_a 表示路段 a 上的流量, $a \in A$; c_a 表示路段 a 的通行能力; t_a^0 表示路段 a 上的零流时间; R 表示 G 中的 OD (origin destination) 对集合, $r \in R$; q_r 表示 OD 对 r 间的交通需求; K_r 表示 OD 对 r 间的路径集合, $k \in K_r$; f_r^k 表示 OD 对 r 间的第 k 条路径上的流量; U_r^k 表示 OD 对 r 间的第 k 条路径的出行前景值; $\delta_r^{k,a}$ 表示 0-1 变量, OD 对 r 间的第 k 条路径经过路段 a 时取 1, 否则取 0.

由于随机的交通需求, 随机的道路通行能力和出行者动态的选择行为等因素决定了交通网络中的出行时间是随机变量. 用 T_r^k 表示 OD 对 r 间的第 k 条路径上的出行时间, 由于篇幅限制, 本文不考虑 T_r^k 的随机性是由什么具体因素 (需求随机或能力随机) 造成的, 只是简单地假设 $T_r^k \sim N(t_r^k, (\sigma_r^k)^2)$, t_r^k 和 $(\sigma_r^k)^2$ 分别表示 T_r^k 的均值和方差, 令 $(\sigma_r^k)^2 = c_{v_r}^k \cdot t_r^k$, $c_{v_r}^k$ 表示离散系数. 这使得本文建立的网络均衡模型具有一般性.

累积前景理论的表述与前景值度量体系为路径选择决策研究提供了科学的分析框架。在路径选择行为中,如果某条路径的出行时间小于参考点时间,出行者会认为选择该条路径获得收益,反之认为获得损失。下面给出基于累积前景理论的路径选择模型中价值函数的形式和累积前景值的计算方法。

$$g_r(x) = \begin{cases} (w_r - x)^\alpha, & x \leq w_r, \\ -\eta(x - w_r)^\beta, & x > w_r, \end{cases} \quad (4)$$

$$U_r^k = \int_{\underline{t}_r^k}^{w_r} \frac{dw(\psi_r^k(x))}{dx} g_r(x) dx + \int_{w_r}^{\bar{t}_r^k} -\frac{dw(1 - \psi_r^k(x))}{dx} g_r(x) dx, \quad (5)$$

其中, w_r 表示参考点, $g_r(\cdot)$ 表示价值函数, $\psi_r^k(\cdot)$ 表示路径出行时间的累积分布函数, \bar{t}_r^k 和 \underline{t}_r^k 分别表示路径出行时间的上下界。出行者总是选择累积前景值最大的那条路径出行。

建立基于累积前景理论的路径选择模型需要解决的一个关键问题是如何确定参考点时间的取值。根据上文的分析,本文选取期望-超额出行时间作为内生的参考点,出行收益表现为认知出行时间小于期望-超额出行时间,出行损失表现为认知出行时间超过期望-超额出行时间。期望-超额出行时间的定义如下:OD 对 r 间的第 k 条路径上的先验置信水平为 ρ (或可靠度为 ρ) 的期望-超额出行时间 $w_r^k(\rho)$ 等于出行时间超过 OD 对 r 间的第 k 条路径上的出行时间预算 $\xi_r^k(\rho)$ 的条件期望值。用数学公式表示为

$$w_r^k(\rho) = E[T_r^k \mid T_r^k \geq \xi_r^k(\rho)], \quad (6)$$

$$\xi_r^k(\rho) = \min \{ \xi \mid P(T_r^k \leq \xi) \geq \rho \}, \quad (7)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示期望, $P(\cdot)$ 表示概率,式(6)和(7)可用最优化问题表示为

$$\min \frac{1}{1 - \rho} \int_{\xi_r^k}^{\infty} T_r^k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r^k} \exp\left(-\frac{(T_r^k - t_r^k)^2}{2(\sigma_r^k)^2}\right) d(T_r^k), \quad (8)$$

$$\text{s. t.} \quad \int_{-\infty}^{\xi_r^k} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r^k} \exp\left(-\frac{(T_r^k - t_r^k)^2}{2(\sigma_r^k)^2}\right) d(T_r^k) \geq \rho, \quad (9)$$

可求得

$$w_r^k(\rho) = t_r^k + \frac{\sigma_r^k}{\sqrt{2\pi}(1 - \rho)} \exp\left(-\frac{(\Phi^{-1}(\rho))^2}{2}\right). \quad (10)$$

则 OD 对 r 的出行时间参考点为

$$w_r = \min_{k \in K_r} \{ w_r^k(\rho) \}. \quad (11)$$

3 基于累积前景理论的网络均衡模型

给定交通网络出行时间的分布,出行者会选取相应的内生参考点进行路径选择决策,所有出行者的路径选择结果会导致新的出行时间分布,出行者再次选择内生参考点和路径;如此反复,直到任一 OD 对间所有被使用路径的出行前景值相等,并且等于该 OD 对间所有路径的最大出行前景值,所有未被使用路径的出行前景值都不大于这个最大前景值;网络达到用户均衡状态,在此均衡状态下,出行时间分布和内生参考点达到稳定状态^[10,14]。

基于累积前景理论的网络均衡的等价数学表述为

$$\begin{cases} f_r^k \geq 0, U_r^k = \bar{U}_r, \\ f_r^k = 0, U_r^k < \bar{U}_r, \end{cases} \quad \forall k \in K_r, r \in R, \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} f_r^k = q_r, \quad \forall r \in R, \quad (13)$$

$$f_r^k \geq 0, \quad \forall k \in K_r, r \in R, \quad (14)$$

$$v_a = \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \delta_r^{k,a} f_r^k, \quad \forall a \in A, \quad (15)$$

其中 \bar{U}_r 表示网络均衡状态下 OD 对 r 间所有路径的最大出行前景值,用 Ω 表示满足式(13) ~ (15)的可行解集,网络均衡的解等价于变分不等式:

$$\sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} (\bar{U}_r - U_r^{k*}) (f_r^k - f_r^{k*}) \geq 0, \quad \forall f_r^k \in \Omega. \quad (16)$$

由于出行时间的分布函数是关于路径流量(或路段流量)的连续函数,由式(10)和(11),内生参考点也是关于路径流量的连续函数,则出行前景值 U_r^k 是凸集 Ω 上的连续函数.由不动点定理,变分不等式(16)有解.

4 算 法

基于连续平均法(method of successive average, MSA)构建求解变分不等式(16)的算法:

第 1 步:令迭代终止误差 $\varepsilon = 0.01, l = 1$;初始化数据 $f^{(l)} = (f_r^{k(l)})_{r \in R, k \in K_r}$;

第 2 步:计算路径出行时间分布和出行前景值 $U^{(l)} = (U_r^{k(l)})_{r \in R, k \in K_r}$;

第 3 步:寻找迭代方向 $g^{(l)}$ 和步长 $\zeta^{(l)}$,迭代方向 $g^{(l)} = f^{(l)'} - f^{(l)}$,对于 $f^{(l)'}$ 中的元素,如果 $U_r^{k(l)} = \max_{i \in K_r} \{U_r^{i(l)}\}$,则 $f_r^{k(l)'} = q_r$,否则 $f_r^{k(l)'} = 0$,取步长 $\zeta^{(l)} = \max(1/100l, 10^{-4})$,则

$$f^{(l+1)} = f^{(l)} + \zeta^{(l)} g^{(l)};$$

第 4 步:收敛性检验,如果 $\|(U^{(l)} - U^{(l+1)})f^{(l)}\| \leq \varepsilon$,结束;否则,令 $l = l + 1$,转至第 2 步.

5 算 例

本文使用的交通网络如图 3 所示,一个 OD 对(1-9),下文公式中省略 OD 对符号 r , 12 个路段,OD 需求 q 是固定的,假设 $q = 6\,000/(\text{veh}/\text{h})$.该交通网络的路段特性如表 1 所示,其中路径-路段关系如表 2 所示.取 6 条路径的离散系数为

$$c_v = [0.50, 0.32, 0.37, 0.70, 0.33, 0.15]^T.$$

取参数

$$\alpha = \beta = 0.88, \eta = 2.25, \gamma = 0.65.$$

表 1 交通网络的路段特性

Table 1 Link characteristics of the example network

a	t_a^0/min	$c_a/(\text{veh}/\text{h})$	a	t_a^0/min	$c_a/(\text{veh}/\text{h})$
1	12	1 800	7	12	1 500
2	12	1 000	8	15	1 000
3	15	1 800	9	10	1 500
4	12	1 500	10	18	1 800
5	18	1 000	11	15	1 000
6	10	1 500	12	15	1 800

表2 路径-路段关系

Table 2 Route-link relationship of the network

k	link (a) sequence
1	3-8-11-12
2	3-6-9-12
3	3-6-7-10
4	1-4-9-12
5	1-4-7-10
6	1-2-5-10

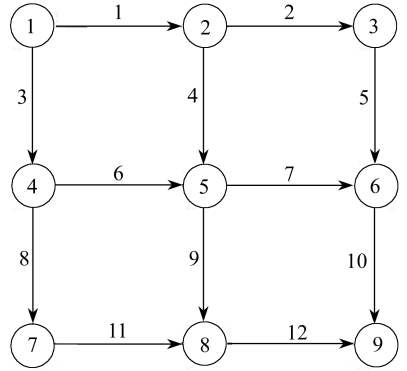


图3 交通网络

Fig.3 Traffic network

当分别采取出行时间预算和期望-超额出行时间(可靠度 $\rho = 85\%$) 为内生的参考点时,算例的结果如表3、表4和图4所示。可以看出,网络达到均衡时,所有被使用的路径具有相同且最大的出行前景值,当采取不同参考点时,用户的路径选择结果有很大的区别,这是因为出行时间预算仅考虑了出行的可靠性,期望-超额出行时间既考虑了出行的可靠性,又考虑了出行的不可靠性。不同的心理认知和风险偏好对用户的路径选择行为和随机网络均衡结果的影响是显著的。

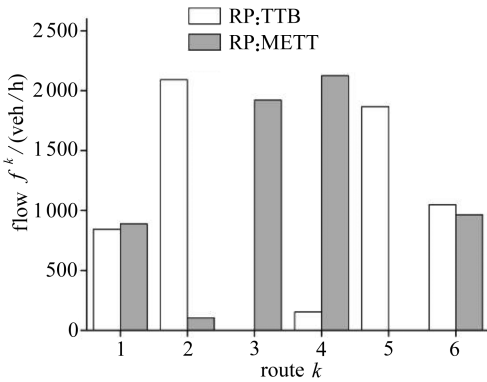


图4 基于累积前景理论的用户路径选择结果

Fig.4 Equilibrium path flow pattern based on CPT

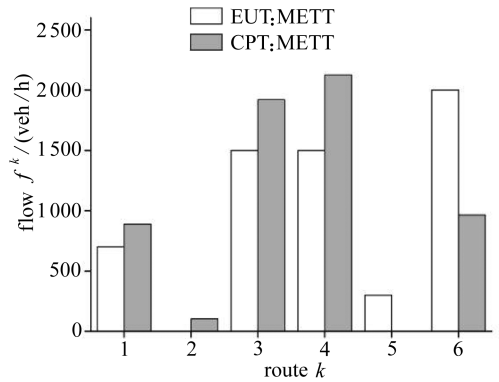


图5 基于期望效用理论和累积前景理论的用户路径选择结果

Fig.5 Equilibrium path flow pattern based on EUT and CPT

表3 基于累积前景理论的用户路径选择结果(参考点为出行时间预算)

Table 3 CPT-based user equilibrium path flow pattern (TTB served as RP)

k	1	2	3	4	5	6
$f^k / (\text{veh/h})$	843	2 091	0	153	1 866	1 047
U^k	5.88	5.88	2.89	5.88	5.88	5.88
t^k / min	97.44	98.23	99.63	96.81	98.20	99.19
σ^k / min	6.98	5.60	6.07	8.23	5.69	3.85
w / min	104.14					

由于期望-超额出行时间本身也可以作为出行者选择路径的依据^[15],图5比较了根据期望-超额出行时间进行配流(基于期望效用理论)和选择期望-超额出行时间作为参考点进行配

流(基于累积前景理论)的用户均衡结果.在期望效用理论中,OD对 r 间的出行者选择第 k 条路径的效用为 V_r^k ,假设 $V_r^k = -T_r^k$.可以看出,两者的均衡结果具有很大的差别,实证研究表明,基于累积前景理论的网络均衡模型更符合实际,更能描述出行者的路径选择心理和网络均衡状态.

表4 基于累积前景理论的用户路径选择结果(参考点为期望-超额出行时间)

Table 4 CPT-based user equilibrium path flow pattern (METT served as RP)

k	1	2	3	4	5	6
$f^k / (\text{veh/h})$	889	103	1 920	2 124	0	964
U^k	8.37	8.37	8.37	8.37	5.68	8.37
t^k / min	98.40	97.79	97.97	99.32	99.50	97.30
σ^k / min	7.01	5.59	6.02	8.33	5.73	3.82
w / min	105.35					

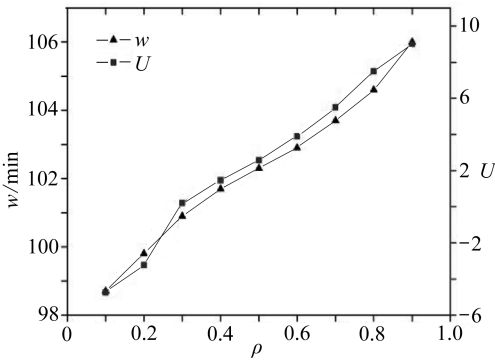


图6 参考点和前景值随可靠度的变化情况
Fig.6 Reference point and prospect value of different confidence level

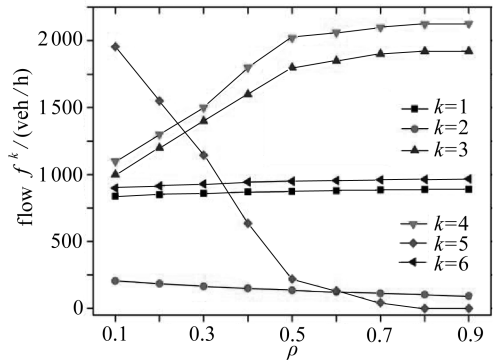


图7 路径流量随可靠度的变化情况
Fig.7 Route flow of different confidence level

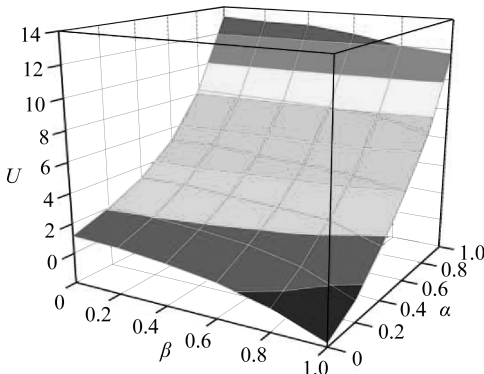


图8 均衡前景值对参数 α 和 β 的灵敏度分析
Fig.8 Sensitivity analyses of parameters α and β on equilibrium prospect value

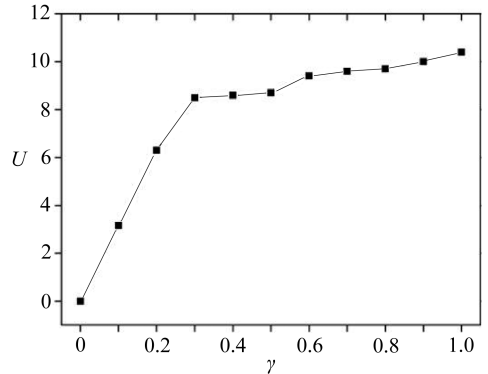


图9 均衡前景值对参数 γ 的灵敏度分析
Fig.9 Sensitivity analyses of parameter γ on equilibrium prospect value

图6和图7描述了当随机网络达到均衡状态时,该网络的参考点时间、均衡前景值和路径流量随可靠度(也叫置信水平)的变化情况.当置信水平增大时,出行者的风险厌恶程度增大,其出行的预留时间会被延长,所以参考点时间也随着相应地增大.当出行者选择更大的参考点时,其每次出行获得收益的可能性更大,所以当随机网络达到均衡状态时,出行者的前景值会

变大,每条路径的流量也会相应地发生变化。

图 8 和图 9 表明了当随机网络达到均衡状态时,均衡前景值对参数 α 、 β 和 γ 的灵敏度,由于 $\rho = 85\%$,出行者选择的参考点时间比较大,出行时获得收益的可能性比较大,所以均衡前景值对参数 α (反映对收益的风险厌恶) 比对参数 β (反映对损失的风险喜好) 更敏感。参数 γ 反映出行者对实际出行时间分布的感知误差,当 γ 越大时,感知误差越小;当 γ 趋向于 1 时,均衡前景值会收敛于一个定值。

6 结 论

本文应用累积前景理论研究了出行者的路径选择行为和随机网络均衡问题,选取期望-超额出行时间作为内生的参考点,反映出行者在选择参考点时既考虑出行时间的可靠性,又考虑出行时间的不可靠性,建立了基于累积前景理论的网络均衡及其等价的变分不等式模型,并运用基于连续平均法的启发式算法求解,最后给出算例验证模型和算法。结果表明,基于累积前景理论的网络均衡模型能够较好地反映出行者选择路径的认知和心理因素。本文只考虑同质用户的情况,异质用户(对出行可靠性有不同要求)的情况有待于进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Avineri E, Prashker J N. Sensitivity to uncertainty: the need for a paradigm shift[J]. *Transportation Research Record*, 2003, **1854**: 90-98.
- [2] Avineri E, Prashker J N. Sensitivity to travel time variability: travelers learning perspective [J]. *Transportation Research Part C*, 2005, **13**(2): 157-183.
- [3] Viti F, Bogers E, Hoogendoorn S. Day-to-day learning under uncertainty with information provision: model and data analysis[C]//*Proceedings of the 16th International Symposium of Transportation and Traffic Theory*. University of Maryland, College Park, MD, 2005.
- [4] Garling T. Behavioral assumptions overlooked in travel choice modeling[C]//Ortuzar D de J, Hensher D, Jara-Diaz S. *Travel Behavior Research: Updating the State of Play*. Oxford, UK: Pergamon, 1998.
- [5] Avineri E, Prashker J N. Violations of expected utility theory in route-choice stated preferences: the certainty effect and inflating of small probabilities [J]. *Transportation Research Record*, 2004, **1894**: 222-229.
- [6] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: an analysis of decision under risk[J]. *Econometrica*, 1979, **47**(2): 263-292.
- [7] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, **5**(4): 297-323.
- [8] Michea A, Polak J. Modelling risky choice behavior: evaluating alternatives to expected utility theory [C]//*Proceedings of the 11th International Conference on Travel Behavior Research*. Kyoto, Japan, 2006.
- [9] Gao S, Frejinger E, Ben-Akiva M. Adaptive route choices in risky traffic networks: a prospect theory approach[J]. *Transportation Research Part C*, 2010, **18**(5): 727-740.
- [10] Xu H, Zhou J, Xu W. A decision-making rule for modeling travelers' route choice behavior based on cumulative prospect theory[J]. *Transportation Research Part C*, 2011, **19**(2): 218-228.
- [11] Avineri E. The effect of reference point on stochastic network equilibrium[J]. *Transporta-*

- tion Science*, 2006, **40**(4): 409-420.
- [12] Connors R D, Sumalee A. A Network equilibrium model with travelers' perception of stochastic travel times[J]. *Transportation Research Part B*, 2009, **43**(6): 614-624.
- [13] Sumalee A, Connors R D, Luathep P. Network equilibrium under cumulative prospect theory and endogenous stochastic demand and supply[C]//Lam W H K, Wong S C, Lo H K. *Transportation and Traffic Theory*. Golden Jubilee, 2009: 19-38.
- [14] Xu H, Lou Y, Yin Y, Zhou J. A prospect-based user equilibrium model with endogenous reference points and its application in congestion pricing[J]. *Transportation Research Part B*, 2011, **45**(2): 311-328.
- [15] Chen A, Zhou Z, Lam W H K. Modeling stochastic perception error in the mean-excess traffic equilibrium model[J]. *Transportation Research Part B*, 2011, **45**(10): 1619-1640.

Traffic Network Equilibrium Model Based on Endogenous Reference Point

WANG Wei, SUN Hui-jun

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: The cumulative prospect theory (CPT) was applied to model travelers' route choice behavior based on bounded rationality in stochastic traffic network. Chosen mean-excess travel time considering both reliability and unreliability aspects of travel time variability as endogenous reference points, a CPT-based network equilibrium model and the equivalent variational inequality formulation were developed. The heuristic algorithm based on the method of successive average was adopted to solve the model. Then, a numerical example was proposed to illustrate the model and the solution algorithm. The effect of bounded rationality and endogenous reference points on such route choice behavior and network equilibrium was presented.

Key words: cumulative prospect theory; endogenous reference points; route choice behavior; network equilibrium; bounded rationality