

具有异质参考点的多用户网络均衡模型^①

田丽君^{1,2}, 黄海军^{2*}, 许岩^{2,3}

(1. 福州大学经济与管理学院, 福州 350108; 2. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191;
3. 内蒙古财经大学统计与数学学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 在具有不确定出行时间的交通网络中, 假设出行者的参考点是异质的, 服从某一连续分布函数, 且风险偏好参数是依赖于参考点的, 建立了一个基于累积前景理论的多用户网络均衡模型. 研究表明, 不同类的用户对风险的反应是不一样的, 具有高参考点和低参考点的出行者均倾向于选择风险高的路径以期获得较高的感知价值, 而具有中等参考点的出行者则倾向于选择风险较低的路径. 此外, 对两种交通管理措施进行了敏感性分析, 结果表明, 道路拓宽对于提高整个社会的感知价值是一个有效的方法, 但其边际效益是递减的. 然而, 就风险管理而言, 不同类的用户表现出不同的喜好. 一般来说, 具有低参考点的出行者能够从这一方法中受益, 而具有高参考点的出行者则会失去潜在的风险收益.

关键词: 参考点; 异质用户; 累积前景理论; 网络均衡

中图分类号: U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2014)07-0001-09

0 引言

由于交通网络属于载流网络, 网络上的交通流状况会受到许多主客观因素的影响, 如雨雪天气、道路维护、交通事故及其它突发事件等, 这些因素造成了出行时间的不确定性. 如何对不确定出行时间下的路径选择行为进行建模分析一直是交通学者关注的热点^[1-2]. 在以往的文献中一般采用期望效用理论(EUT)对路径选择行为进行建模分析, 然而这一理论却受到了来自行为心理学家的质疑^[3-4], 指出个体在进行决策时并不是基于绝对量, 而是基于某一参考点的相对量对备选方案进行评价. 来自心理认知领域的大量研究表明, 参考点在个体评价和选择过程中起着不可忽视的作用^[5-8].

最近, 考虑出行者的参考点特性对出行行为建模吸引了大量学者的关注^[9-10]. Katsikopoulos

等^[11]通过实验方法首次证明个体的出行行为存在“参考点依赖”特性. 张杨等^[12]通过实际调查发现, 出行者的择路行为依赖出行目的、约束时间、对路径的熟悉程度以及路径的不确定程度而变化. Jou等^[13]运用前景理论研究了出发时间选择问题, 并通过数据调查验证了出行决策符合前景理论. Schwanen和Ettema^[14]通过估计价值函数和权重函数的系数, 进一步检验了累积前景理论用于描述出行者应对不确定的交通网络的适用性. 除了前面提到的基于实证调查的研究之外, 理论分析方面也取得了不少进展. Avineri^[15]在一个简单路网中研究了“参考点”在路径选择行为中的重要性. 研究表明, “参考点”不同, 出行者在相同环境下的选择也会不同. Connors和Sumalee^[16]通过对出行时间的实际发生概率进行非线性变换获得感知概率, 分析了基于前景理论的出行者路径选择行为. 徐红利等^[17]考虑出行者的有限理性

① 收稿日期: 2012-05-02; 修订日期: 2013-05-14.

基金项目: 国家重大基础研究计划资助项目(2012CB725400); 国家自然科学基金资助项目(71301028); 教育部人文社科研究青年基金资助项目(12YJCZH186); 福建省自然科学基金资助项目(2013J05068).

通讯作者: 黄海军(1964—), 男, 湖南望城人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: haijunhuang@buaa.edu.cn

和参考点依赖特性,以基于累积前景理论的路径选择决策规则为基础,建立了随机网络用户均衡及其等价的变分不等式条件,力图展示现实中的交通流分布形态.假设参考点是内生的,是出行者为保证准时到达概率而预留出的出行时间, Xu 等^[18]进一步建立了等价的变分不等式条件,运用累积前景理论对出行者的路径选择行为进行了分析.

一般来说,日常出行中路径时间通常是不确定的,也就是说,出行者在进行路径选择时面临一定的风险^[19].为了获得较高的感知价值,出行者不仅会把握确定因素,同时还会结合自身的风险态度和心理认知,对潜在的不确定因素进行综合判断,在此基础上作出最终决策.对于不同的交通个体来说,由于其风险态度和出行目的各有不同,因此在进行决策时所依赖的参考点也是彼此不同的.在以往的研究中,一个标准的假设是出行者具有相同的参考点^[15],这显然有悖于现实生活中的出行者特征.基于这一原因,本文考虑具有异质参考点的多用户情形,并假设风险偏好参数是依赖于参考点的,考察加入这些因素后出行者的路径选择结果呈现出的新特点,希望能够给出更加符合现实情景的流量统计估计结果和提出较为合理的政策建议.

1 前景理论和累积前景理论

前景理论是针对风险决策的心理描述模型,这一理论被广泛应用在经济学和社会心理学等领域^[20].它描述了出行者如何通过两个步骤来评价涉及风险的备选方案:编辑阶段和评估阶段.在编辑阶段,相对于参考点备选方案的结果被划分为获得和损失两个区域.在评估阶段,通过价值函数和权重函数估计备选方案的前景值.价值函数 $\varphi(x)$ (图1) 在获得部分表现为凹函数,在损失部分表现为凸函数,且在损失部分更为陡峭,这体现了个体对财富减少更加敏感的特性.依据这些描述,价值函数定义为

$$\varphi(x) = \begin{cases} (x - x_0)^\alpha, & x > x_0 \\ -\lambda(-x + x_0)^\beta, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中参数 $0 < \alpha, \beta \leq 1$ 测量远离参考点 x_0 时敏感性递减的程度,参数 $\lambda \geq 1$ 是风险规避参数.权重

函数 $w(p)$ 是通过一个非线性函数进行概率转换,将事件发生的实际概率转化为个体的感知概率,大量的实证数据表明它一般表现为图2所示的反S形.显然,这将高估小概率,低估中概率和高概率.

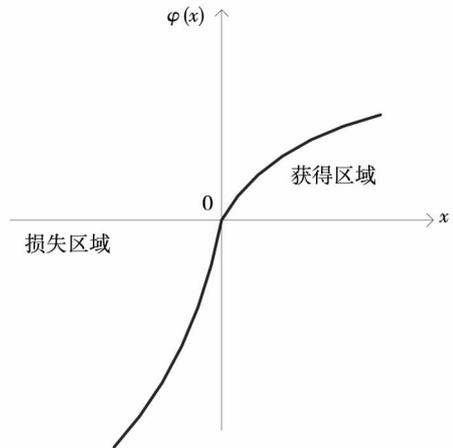


图1 价值函数
Fig. 1 Value function

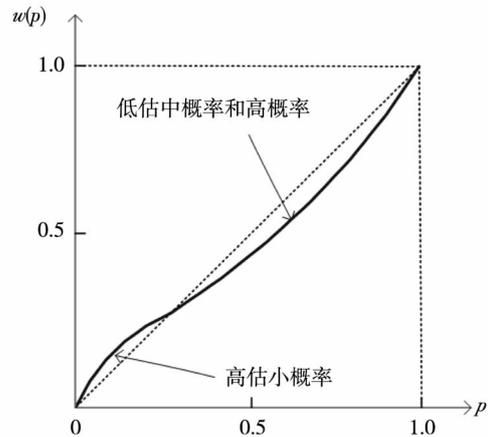


图2 权重函数
Fig. 2 Weighting function

在前景理论^[4]和序列相关期望效用理论^[21]的基础上, Tversky 和 Kahneman^[22]进一步发展了累积前景理论(CPT),这一新的理论采用累积的而不是单一的决策权重,因此可以用于无限的甚至连续的备选方案情形.假设某一不确定的备选方案 f 由一系列组合 (x_i, p_i) 构成,且 $-m \leq i \leq n$.为简单起见,令结果 x_i 按照递增的方式排序.正的下标用来表示正的可能结果,负的下标用来表示负的可能结果,0 表示中性的可能结果.那么决策权重 π_i^+ 和 π_i^- 可以表示为

$$\pi_i^+ = w^+(p_i + \dots + p_n) - w^+(p_{i+1} + \dots + p_n) \quad (2)$$

当 $0 \leq i < n$ 且 $\pi_n^+ = w^+(p_n)$;

$$\pi_i^- = w^-(p_{-m} + \dots + p_i) - w^-(p_{-m} + \dots + p_{i-1}) \quad (3)$$

当 $-m < i \leq 0$ 且 $\pi_{-m}^- = w^-(p_{-m})$

其中 p 和 $w(p)$ 分别表示事件发生的实际概率和感知概率. 需要指出的是, 为损失和获得区域分配不同的权重函数是可行的, w^+ 和 w^- 分别对应获得和损失部分的权重函数. 不失一般性, 本文采用如下形式的权重函数^[23]

$$w^+(p) = w^-(p) = \exp(-(-\ln(p))^\gamma) \quad (4)$$

显然, 权重函数的曲率由参数 $0 < \gamma \leq 1$ 决定, 且权重函数通常表现为严格递增函数, 这体现了人们对高概率比低概率更加重视的事实.

根据上述的价值函数和权重函数 f 的感知价值可以表示为

$$V = V^+ + V^-, \quad (5)$$

其中 $V^+ = \sum_{i=1}^n \pi_i^+ \varphi(x_i)$ 和 $V^- = \sum_{i=-m}^0 \pi_i^- \varphi(x_i)$, V^+ 表示获得部分的感知价值, V^- 表示损失部分的感知价值.

2 用户异质性

前景理论的一个基本特征是备选方案会根据参考点划分为获得和损失两个区域. 一般来说, 参考点显著影响对备选方案感知价值的评估, 因此在建模过程中选择合理的参考点进行分析是非常必要的. 由于出行者具有不同的风险态度和出行目的, 因此进行路径选择决策的参考点是彼此不同的. 本文考虑这一因素, 假设出行者是异质的, 具有不同的参考点. 为简单起见, 采用服从均匀分布的参考点分布函数. 设 $g(\omega)$ 是连续均匀分布函数的概率密度函数 (PDF), 在区域 $[\omega_0, \omega_{\max}]$ 内定义为

$$g(\omega) = \frac{1}{(\omega_{\max} - \omega_0)} \quad \omega_0 < \omega < \omega_{\max} \quad (6)$$

其中 ω_0, ω_{\max} 分别对应最小和最大的参考点. 假设所有出行者根据递增的参考点进行排序, 将整个出行群体按照相等的长度分为 M 类, 第 m 类用户

分布在如下定义区间内

$$[\omega_{m-1}, \omega_m] = \left[\omega_0 + \frac{m-1}{M}(\omega_{\max} - \omega_0), \omega_0 + \frac{m}{M}(\omega_{\max} - \omega_0) \right] \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

那么, 根据均匀分布的特殊性, 第 m 类用户的参考点均值定义为

$$u_0^m = (\omega_{m-1} + \omega_m) / 2, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

设 Q_w 是起迄 (OD) 对 $w \in W$ 之间的总出行需求, 则 OD 对 $w \in W$ 之间第 m 类用户的出行需求可表示为

$$Q_w^m = Q_w / m, \quad w \in W, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

对于每类用户来说, 除了参考点是异质的, 本文假设风险偏好参数是依赖于参考点的, 因此也是异质的, 具体的计算公式定义如下

$$\alpha^m = \beta^m = (1 - u_0^m / u_0^M)^\zeta \quad (10)$$

其中 $\zeta \leq 1$ 是规模参数, 这意味着参考点或期望水平越小, 其价值函数对应的敏感性递减的程度就越大, 也就是说, 个体对相同大小的变化更加敏感. 基于这一假设, 图 3 给出了不同用户类的价值函数曲线.

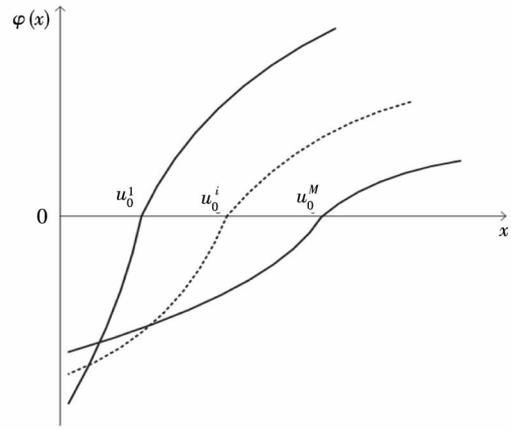


图 3 不同用户类对应的价值函数

Fig. 3 Value functions for different user classes

3 基于 CPT 的多用户网络均衡模型

3.1 基于 CPT 的路径感知价值

假设路径出行时间是服从某一连续分布的随机变量, 出行者在出行前准确地知道出行时间的分布函数, 这主要源于过去的出行经验或来自诱导系统的预测. 与 Connors 和 Sumalee^[16] 的处理方式一致, 将出行成本作为负效用. 假设出行行为

是受目的地的出行收益 G_w 所激励, 则 OD 对 $w \in W$ 之间路径 k 上的最终效用可以表示为

$$U_w^k = G_w - C_w^k \tag{11}$$

其中 C_w^k 表示 OD 对 $w \in W$ 之间路径 k 上的出行成本. 为简单起见, 下文中省略变量对应的下标.

出行者将通过比较各条路径的感知价值进行出行决策, 从而最大化出行路径的感知价值. 假设路径出行时间服从连续正态分布函数, 其累积密度函数(CDF) 为 $\Phi_U(u)$, 参考点为 u_0 . 根据式(5) 感知价值(PV) [16] 可表示为

$$V = V^+ + V^- = \int_{u_0}^{\infty} -\frac{dw^+(1 - \Phi_U(u))}{du} \times \varphi(u) du + \int_{-\infty}^{u_0} \frac{dw^-(\Phi_U(u))}{du} \varphi(u) du \tag{12}$$

3.2 多用户网络均衡模型

在考虑异质参考点和风险偏好参数的前提下, 本节将建立一个一般化的多用户网络均衡模型. 考虑一个交通网络, 定义为 $Z = (N, A)$, 其中 N 是节点集合, A 是有向路段集合. R_w 是在 OD 对 $w \in W$ 之间所有路径 r 的集合. 对于路段 $a \in A$ 上的出行时间, 采用美国联邦公路局函数(BPR 函数) 定义为

$$t_a(x_a) = t_a^0(1.0 + 0.15(x_a/C_a)^4), a \in A \tag{13}$$

其中 t_a^0 是自由流出行时间, x_a 是路段 $a \in A$ 上的流量, C_a 是路段 $a \in A$ 的通行能力. 所有出行者都希望最大化出行路径的感知价值, 在网络均衡态, 属于同一类的用户具有相同的路径感知价值, 很显然, 均衡问题等价于如下条件

$$V_{rw}^m - V_w^m \leq 0, \text{ 如果 } f_{rw}^m = 0, r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \tag{14}$$

$$V_{rw}^m - V_w^m = 0, \text{ 如果 } f_{rw}^m > 0, r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \tag{15}$$

其中 V_w^m 是 OD 对 $w \in W$ 之间第 m 类用户的最大感知价值, V_{rw}^m 是在 OD 对 $w \in W$ 之间路径 $r \in R_w$ 上第 m 类用户的均衡感知价值, f_{rw}^m 是 OD 对 $w \in W$ 之间路径 $r \in R_w$ 上第 m 类用户的路径流量. 在均衡态, 只有具有第 m 类用户最大感知价值的路径被第 m 类用户使用, 其它具有等于或低于第 m 类用户最大感知价值的路径不被第 m 类用户使用.

换言之, 没有任何出行者可以通过单方面改变自己的路径选择而变得更好. 此外, 在均衡态, 以下守恒约束和非负条件必须得到满足

$$\sum_{r \in R_w} f_{rw}^m = Q_w^m, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \tag{16}$$

$$x_a^m = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} f_{rw}^m \delta_{ar}^w, a \in A, m = 1, 2, \dots, M \tag{17}$$

$$x_a = \sum_{m=1}^M x_a^m, a \in A \tag{18}$$

$$f_{rw}^m \geq 0, r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \tag{19}$$

这里 x_a^m 是路段 a 上第 m 类用户的流量, δ_{ar}^w 是矩阵因子, 如果 $a \in A$ 在 OD 对 $w \in W$ 之间的路径 r 上, 则等于 1, 否则为 0.

3.3 求解算法

本文采用相继平均法(MSA) 求解式(14) — 式(19) 对应的多用户网络均衡问题. 具体步骤如下:

步骤0 初始化. 设 $n = 1$, 产生初始可行流 $\{f_{rw}^{m(1)}\}$, 然后, 根据式(17) 和式(18), 进一步得到 $x_a^{m(1)}$ 和 $x_a^{(1)}$.

步骤1 比较感知价值. 根据公式(12) 计算 OD 对 $w \in W$ 之间路径 r 上每类用户 m 的感知价值 $V_{rw}^{m(n)}$. 比较 OD 对 $w \in W$ 之间路径 r 上每类用户 m 的感知价值 $V_{rw}^{m(n)}$, 并找到用户类 m 的最大感知价值 $V_w^{m(n)}$.

步骤2 流量更新. 设 $\hat{R}_w^m = \{r : V_{rw}^{m(n)} = V_w^{m(n)}, r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M\}$, g_{rw}^m 为 f_{rw}^m 的辅助变量. 对于任意路径 $r \in \hat{R}_w^m$, 设 $g_{rw}^{m(n)} = Q_w^m / |\hat{R}_w^m|$ ($|\cdot|$ 表示取变量的个数), 否则设 $g_{rw}^{m(n)} = 0$. 对于每类用户 m , 更新流量计算如下

$$f_{rw}^{m(n+1)} = f_{rw}^{m(n)} + \frac{1}{n}(g_{rw}^{m(n)} - f_{rw}^{m(n)}), r \in R_w, w \in W, m = 1, 2, \dots, M \tag{20}$$

$$x_a^{m(n+1)} = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} f_{rw}^{m(n+1)} \delta_{ar}^w, a \in A, m = 1, 2, \dots, M \tag{21}$$

$$x_a^{(n+1)} = \sum_{m=1}^M x_a^{m(n+1)}, a \in A \tag{22}$$

步骤3 收敛性判断. 如果收敛因子 $G =$

$$\sum_{w \in W} \sum_{m=1}^M \left| \frac{V_w^{m(n)} - V_w^{m(n-1)}}{V_w^{m(n)}} \right| \leq \varepsilon \text{ 或 } n > n_{\max} \text{ 满足 则}$$

迭代终止, 否则设 $n = n + 1$, 返回步骤 1.

4 数值算例

考虑一个具有两条路段的简单网络, 如图 4 所示. OD 对之间的总出行需求为 $Q = 3\,000$, 出行收益为 $G = 100$. 假设整个出行群体被分为 $M = 10$ 份, 其对应的最小和最大参考点分别设为 $\omega_0 = 20$ 和 $\omega_{\max} = 80$. 风险偏好参数设为 $\gamma = 0.74$, $\lambda = 2.25$, $\zeta = 1/3$. 两条路段的自由流时间和通行能力分别设为 $[t_1^0, t_2^0] = [12, 30]$ 和 $[C_1, C_2] = [1\,000, 1\,000]$. 假设两条路径上的出行时间方差满足关系式 $\sigma_1 = \eta\sigma_2$, 取 $\sigma_2 = 2$ 和 $\eta = 4$. 为便于分析, 将 $\zeta = 1/3$ 作为采用如上定义的参数的标准情形. 这个算例的典型特征是一条路径出行时间较短但风险较高, 而另一条路径出行时间较长却更加稳定. 如没有特别说明, 所有图中的计算结果均采用上述给出的参数内容.

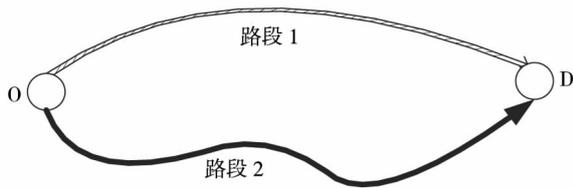


图 4 两条路段的测试网络
Fig. 4 A two-link test network

为了显示两条路径的方差比例对流量分布的影响, 图 5 中首先画出了随参数 η 改变时路径 1 上的流量. 如图所示, 随着参数 η 增加, 相对而言, 路径 1 的出行风险变得越来越大. 因此在三种情形下都表现为路径 1 上的部分出行者逐步转向路径 2, 这表明出行风险显著影响出行者的路径选择行为. 此外, 路径 1 上的流量总是大于平均流量 1 500, 这意味着多数出行者依然选择路径 1 而不是路径 2. 这是因为尽管路径 1 上的出行时间风险越来越大, 但路径 1 却具有较短的自由流时间, 因此大部分出行者依然倾向于选择路径 1 以期获得较高的感知价值. 对比三种情形下的结果可以发现, 当 $M = 1$ 时, 路径 1 上的流量被低估, 而当 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 时被高估.

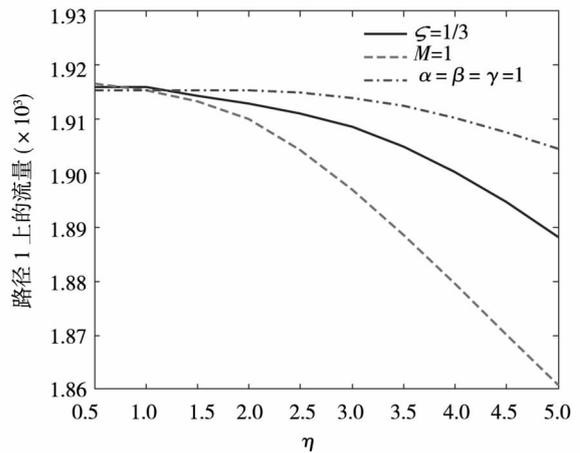


图 5 三种情形下改变参数 η 时路径 1 上的流量
Fig. 5 Flow on route 1 against the parameter η under three different scenarios

图 6 进一步给出了改变参数 η 时不同类用户在路径 1 上的流量. 如图所示, 当 $\eta = 1$ 时, 两条路径具有相同的出行时间方差, 不同类的用户在路径 1 上的流量是相等的. 当 $\eta = 0.5$ 时, 具有较低和较高参考点的出行者更愿意选择路径 2, 而具有较低和居中参考点的出行者更愿意选择路径 1. 而当 $\eta = 5$ 时, 结果基本是反过来的. 尽管具有较低和较高的参考点的出行者的选择是类似的, 然而原因却并不相同. 对于具有高参考点的出行者来说, 他们愿意选择具有高风险的路径是因为他们对风险的敏感性较低, 而具有低参考点的出行者, 是因为他们具有较低的期望. 这一发现表明, 风险对于每类用户所起的作用是不同的, 因此有必要识别这些区别, 从而采用合理的交通控制策略来管理道路拥挤.

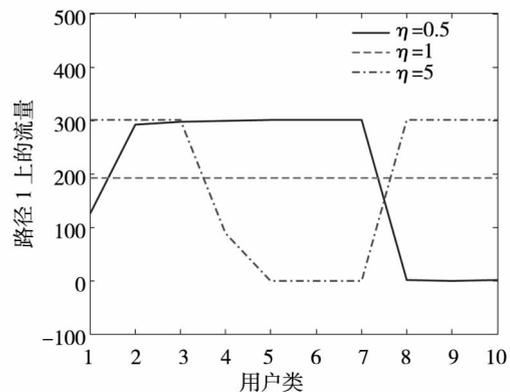


图 6 对应不同的参数 η 不同用户类在路径 1 上的流量
Fig. 6 Flow on route 1 against user classes with variable parameter η

为进一步了解风险偏好参数对路径感知价值

的影响,图7显示了采用三组不同的参数时对应每类用户的感知价值.当 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 时,除了出行时间是不确定的以外,这类似于传统的确定性UE.如图所示,PV呈现出下降的趋势,考虑到出行者是按照参考点大小按顺序排列的,这是对“期望越大,失望越大”这一谚语的典型描绘.当 $\alpha = \beta = 0.88$ 时,感知价值与 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 时一样,同样呈现出下降的趋势,但下降速度较缓,这是因为出行者变得不那么敏感所致.当 $\delta = 1/3$ 时,也就是在标准情形下,感知价值同样也是逐步减少的,但下降曲线是凸的.对比各类用户的感知价值可以发现,第7类用户之前的出行者的感知价值是正的,也就是说他们认为出行是有利的;而在第7类用户之后的出行者的感知价值是负的,他们认为出行带来的是损失.

接下来,图8画出了当参数 ζ 改变时不同用户类在路径1上的流量.如图所示,与前面的分析一致,具有较低和较高参考点的出行者更愿意选择路径1,而具有居中参考点的出行者更愿意选择路径2.随着参数 ζ 的增加,路径1越来越受到具有次高参考点的用户的喜爱.主要原因是,随着参数 ζ 的增加,具有低参考点和高参考点的出行者之间的敏感性递减的程度之差变得越来越大.与 $\zeta = 0.1$ 和 $\zeta = 0.2$ 相比,当 $\zeta = 1$ 时,具有次高参考点的出行者更愿意选择路径1以期获得更

高的感知价值.

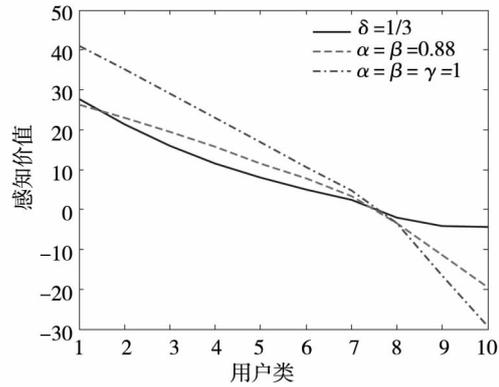


图7 风险偏好参数改变时各用户类对应的感知价值

Fig.7 The PV against user classes with different risk preference parameters

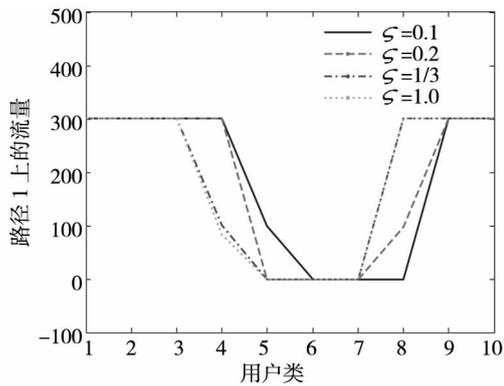
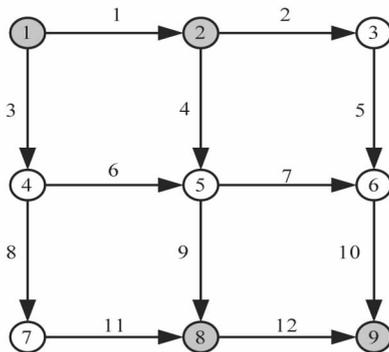


图8 对应不同的参数 ζ 不同用户类在路径1上的流量

Fig.8 Flow on route 1 against user classes with variable parameter ζ



- OD1: 1→8
- 路径 1=(3, 8, 11)
- 路径 2=(3, 6, 9)
- 路径 3=(1, 4, 9)
- OD2: 2→9
- 路径 4=(4, 9, 12)
- 路径 5=(4, 7, 10)
- 路径 6=(2, 5, 10)

图9 六条路径的测试网络
Fig. 9 A six-route test network

接下来,在一个稍微复杂的网络上研究出行者的路径选择行为.如图9所示,网络包含两个OD对,每个OD对之间有三条路径.两个OD对之间的总出行需求为 $Q = [3\ 000\ 3\ 000]$.定义 C 为路段通行能力的矩阵, C_a 是其元素 σ 为每条路径上的出行时间方差的矩阵.在这一算例中,设 $\sigma =$

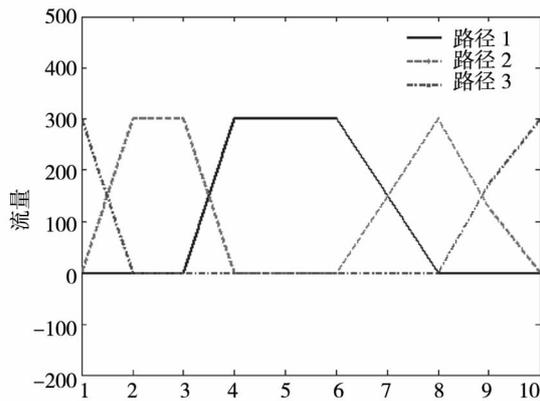
$[7.5\ 10\ 15\ 15\ 10\ 7.5]$,流量时间函数的参数在表1中列出,不难发现,在六条路径上对应的自由流出行时间分别为 $[45, 35, 34, 37, 42, 48]$.其它参数与图4中具有两条路段的网络中的参数一样.特别地,定义 $C = \theta \times C$ 和 $\sigma = \vartheta \sigma$ 来进一步分析道路拓宽和风险管理对不同类出行者的感

知价值的影响.

表 1 流量时间函数的参数列表

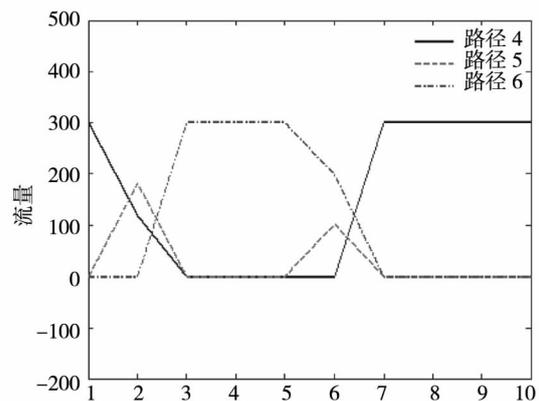
Table 1 List of parameters for the volume-time function

路段	t_a^0	C_a	路段	t_a^0	C_a
1	12	1 500	7	12	1 200
2	12	1 200	8	15	1 800
3	15	1 800	9	10	2 400
4	12	1 800	10	18	1 200
5	18	1 200	11	15	1 800
6	10	1 000	12	15	1 800



(a) 用户类

图 10 中显示了两个 OD 对中六条路径上的流量, 从图 10(a) 可以发现, 具有高参考点的出行者选择路径 2 和路径 3, 具有中参考点的出行者主要选择路径 1, 具有低参考点的出行者主要选择路径 2 和 3. 从图 10(b) 可以发现, 具有高参考点的出行者选择路径 4, 具有中参考点的出行者选择路径 6. 结果表明, 与在两条路径的简单网络中的分析结果一致, 具有高参考点的出行者由于出行期望较高, 因此更倾向于选择风险高的路径以期获得较高的感知价值.



(b) 用户类

图 10 不同用户类在各条路径上的流量

Fig. 10 Flow on different routes against user classes

图 11 给出了随参数 θ 改变时不同用户类的 IPV. 这里 IPV (improved perceived value) 表示在道路拓宽和风险管理之后比之前所提高的感知价值. 如图所示, IPV 首先随着用户类波动, 然后突然下降, 这意味着道路拓宽能够给具有低参考点和中参考点的出行者带来类似的好处, 而具有高参考点的出行者获得的收益相对较低, 这似乎反映出具有低参考点和中参考点的出行者更容易满足的特性. 另一方面, 随着道路通行能力拓宽程度逐渐增大, 尽管不同用户的 IPV 也相应地逐步提高, 但整个社会的边际 IPV 却呈现出递减的趋势. 这表明道路拓宽是一个提高出行者感知价值和降低交通拥挤的有效方法, 但其边际效应是递减的.

此外, 图 12 进一步研究了风险管理对于不同用户类 IPV 的影响. 可以发现, IPV 首先增加, 然后下降, 随后再增加. 随着参数 θ 的逐渐减少, 即路径出行时间风险变得越来越小时, 第 5 类用户获得的收益越来越大, 而第 7 类用户却遭受最严

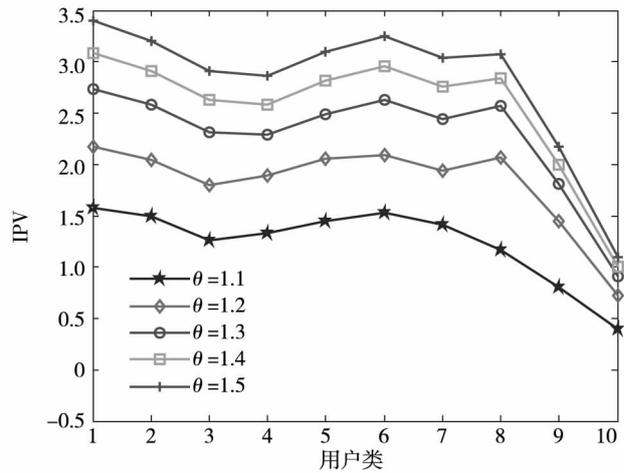


图 11 对应不同的参数 θ , 不同用户类的 IPV

Fig. 11 The IPV against user classes with variable parameter θ

重的损失. 另一方面, 对于一个给定的参数 θ , 可以发现, 具有低参考点的出行者的正值 IPV 基本上与具有高参考点的负值 IPV 对称. 这意味着风险管理对于低参考点的出行者是有利的, 但同时

也减少了具有高参考点的出行者的潜在的风险收益. 因此, 采取风险管理措施必须是谨慎的.

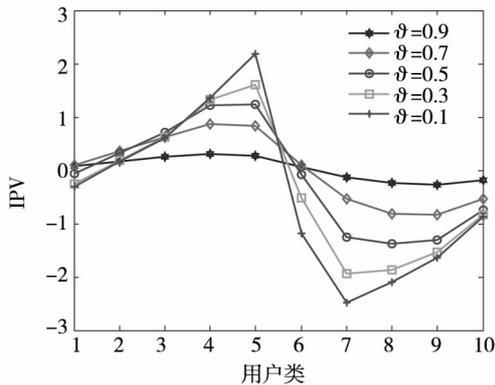


图 12 对应不同的参数 ϑ , 不同用户类的 IPV

Fig. 12 The IPV against user classes with variable parameter ϑ

5 结束语

在前景理论中, 给定一个参考点, 备选方案的

结果将被划分为获得和损失两个部分. 在现实生活中, 不同的出行者由于收入水平、风险偏好等差异, 对备选方案的期望是不同的, 因此, 表现出的参考点也是彼此不同的. 本文考虑具有异质参考点和风险偏好参数的多用户出行者, 考察了加入这些因素对流量分布结果和出行者感知价值的影响. 研究表明, 风险对于每类用户起着不同的作用. 具有高参考点和低参考点的出行者均倾向于选择风险高的路径以期获得较高的感知价值, 而具有中等参考点的出行者则倾向于选择风险较低的路径. 此外, 针对两种交通管理措施的研究表明, 道路拓宽对于提高整个社会的感知价值是一个有效的方法, 但其边际效益是递减的. 而风险管理对不同类的用户的影响是不同的. 一般来说, 具有低参考点的出行者能够从这一方法中受益, 而具有高参考点的出行者则会失去潜在的风险收益.

参考文献:

[1] Lo H K, Luo X W, Siu B W Y. Degradable transport network: Travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion [J]. *Transportation Research Part B*, 2006, 40(9): 792-806.

[2] Watling D. User equilibrium traffic network assignment with stochastic travel times and late arrival penalty [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 175(3): 1539-1556.

[3] Allais M. Le comportement de l'homme rationnel devant le risqué: Critique des postulats et axiomes de l'Ecole américaine [J]. *Econometrica*, 1953, 21(4): 503-546.

[4] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-291.

[5] Köszegi B, Rabin M. A model of reference-dependent preferences [J]. *Quarterly Journal of Economics*, 2006, 121(4): 1133-1165.

[6] Munro A, Sugden R. On the theory of reference-dependent preferences [J]. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2003, 50(4): 407-428.

[7] Schmidt U. Reference dependence in cumulative prospect theory [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2003, 47(2): 122-131.

[8] Sugden R. Reference-dependent subjective expected utility [J]. *Journal of Economic Theory*, 2003, 111(2): 172-191.

[9] 徐红利, 周晶, 徐薇. 基于累积前景理论的随机网络用户均衡模型 [J]. *管理科学学报*, 2011, 14(7): 1-7.
Xu Hongli, Zhou Jing, Xu Wei. Cumulative prospect theory-based user equilibrium model for stochastic network [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(7): 1-7. (in Chinese)

[10] Xu H L, 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] Katsikopoulos K V, Fisher D L, Anthony D, et al. Risk attitude reversals in drivers' route choice when range of travel time is provided [J]. *Human Factors*, 2002, 44(3): 466-467.

[12] 张 扬, 贾建民, 黄 庆. 城市交通车辆择路行为实证研究 [J]. *管理科学学报*, 2007, 10(5): 78-85.
Zhang Yang, Jia Jianmin, Huang Qing. Vehicle routing choice in urban traffic [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2007, 10(5): 78-85. (in Chinese)

- [13]Jou R C , Kitamura R , Weng M C , et al. Dynamic commuter departure time choice under uncertainty [J]. *Transportation Research Part A* ,2008 ,42(5) : 774 – 783.
- [14]Schwanen T , Ettema D. Coping with unreliable transportation when collecting children: Examining parents' behavior with cumulative prospect theory [J]. *Transportation Research Part A* ,2009 ,43 (5) : 511 – 525.
- [15]Avineri E. The effect of reference point on stochastic network equilibrium [J]. *Transportation Science* ,2006 ,40(4) : 409 – 420.
- [16]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.
- [17]徐红利 ,周 晶 ,徐 薇. 考虑参考点依赖的随机网络用户均衡与系统演化 [J]. *系统工程理论与实践* ,2010 ,30 (12) : 2283 – 2289.
Xu Hongli , Zhou Jing , Xu Wei. Stochastic network user equilibrium and system evolution with dependence on reference point [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice* ,2010 ,30(12) : 2283 – 2289. (in Chinese)
- [18]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* ,2011 ,45(2) : 311 – 328.
- [19]Siu B , Lo K H. Doubly uncertain transport network: Degradable capacity and stochastic demand [J]. *European Journal of Operational Research* ,2008 ,191(1) : 166 – 181.
- [20]Popescu W , Wu Y. Dynamic pricing strategies with reference effects [J]. *Operations Research* ,2007 ,55(3) : 413 – 429.
- [21]Quiggin J. A theory of anticipated utility [J]. *Journal of Economic Behavior and Organization* ,1982 ,3(4) : 323 – 343.
- [22]Tversky A , Kahneman D. Advances in prospect-theory-cumulative representation of uncertainty [J]. *Journal of Risk and Uncertainty* ,1992 ,5(4) : 297 – 323.
- [23]Prelec D. The probability weighting function [J]. *Econometrica* ,1998 ,66(3) : 497 – 527.

Modeling the multi-class network equilibrium for travelers with heterogeneous reference points

TIAN Li-jun^{1 2} , *HUANG Hai-jun*^{2*} , *XU Yan*^{2 3}

1. School of Economics and Management , Fuzhou University , Fuzhou 350108 , China;

2. School of Economics and Management , Beihang University , Beijing 100191 , China;

3. School of Statistics and Mathematics , Inner Mongolia University of Finance and Economics , Hohhot 010051 , China

Abstract: In a traffic network with uncertain travel time , we postulate that the travelers are heterogeneous in terms of their reference points , which follow a continuous distribution function , and at the same time the degree of the diminishing sensitivity is dependent on the reference points. We then develop a multi-class , cumulative prospect theory-based equilibrium model by incorporating these heterogeneities. The results show the risk is treated by different users in different manners: those with higher and lower reference points prefer the routes with higher risks to get a higher perceived value , and those with medium reference points mainly focus on the routes with lower risks. In addition , a sensitivity analysis is conducted with respect to two management methods , i. e. , road expansion and risk management in improving the perceived value for each kind of users. The results show that road expansion is an effective way in improving the social perceived value but with decreasing marginal effect. However , as far as risk management is concerned , different users represent distinct preferences. In general , users with lower reference points can benefit from it while users with higher reference points will lose their potential gain.

Key words: reference point; heterogeneous users; cumulative prospect theory; network equilibrium