

文章编号:1672-9331(2021)01-0058-08

基于累积前景理论的通勤出行联合决策模型

王 顺¹, 杨 欢², 况爱武², 姜宁宇²

(1. 长沙市建设工程质量安全监督站, 湖南 长沙 410016;

2. 长沙理工大学 智能道路与车路协同湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究不确定交通环境下的通勤出行决策行为, 考虑出行者的有限理性, 基于累积前景理论构建了出发时刻、路径的联合决策模型。该模型包含3个参考点, 即可接受的最早、最晚到达时间和行程时间, 且风险偏好系数考虑了行程时间的可靠性及参考点的影响。基于所选取的参考点计算价值函数与权重函数, 并依据前景值最大确定出行方案。算例研究结果表明: 可靠度要求高的通勤人群偏向于在较晚的时间出发、选择风险较小的路径出行; 可靠度要求低的通勤人群偏向于在较早的时间出发、选择行程时间较短的路径出行。本研究的成果可为动态路径诱导以及交通需求管理措施的效果评估提供一定的理论依据。

关键词: 累积前景理论; 行程时间可靠性; 风险偏好系数; 联合决策模型; 贝叶斯理论

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Joint decision model of commuting travel based on cumulative prospect theory

WANG Shun¹, YANG Huan², KUANG Ai-wu², JIANG Ning-yu²

(1. Changsha Construction Project Quality and Safety Supervision Station, Changsha 410016, China;

2. Hunan Key Laboratory of Smart Roadway and Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems,
Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To study the decision-making behaviors of commuters in uncertain traffic environment, based on the cumulative prospect theory, a joint decision model with departure time and travel route was constructed considering the bounded rationality of traveler. The model includes three reference points as follows: the earliest, the latest acceptable arrival time and the travel time. At the same time, the impact of travel time reliability and reference points was considered for the risk preference coefficient. According to the selected reference points, the value function and decision weight function could be calculated by the model, and the travel plan could be determined through selecting the maximum prospect value. The results of the example show that commuters with high reliability requirements tend to depart later and select less risky routes to travel, while those with low reliability requirements tend to depart earlier and select the routes with shorter travel time to travel. To some extent, the research results can provide a theoretical basis for the dynamic route guidance and the effect evaluation of travel demand management strategies.

Key words: cumulative prospect theory; travel time reliability; risk preference coefficient; joint decision model; Bayesian theory

收稿日期: 2020-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678075); 湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2171); 湖南省交通科技项目(201920)

通讯作者: 王 顺(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事交通运输与安全方面的研究。E-mail: 389392357@qq.com

1992 年, Kahneman 和 Tversky 提出了累积前景理论。该理论是一个充分考虑决策者主观风险态度的描述性范式决策模型, 是心理学及行为科学领域的重要研究成果。Katsikopoulos 等^[1]首次将累积前景理论运用于交通领域, 随后, 不少学者利用累积前景理论来研究出行决策问题。尚山^[2]认为面对不确定的交通系统, 出行者对出行时间的选择与其个人、家庭、社会、交通等因素有关, 具有明显的不确定性; 张波等^[3]对累积前景理论在出行行为研究方面的适用性进行了探讨; 栾琨等^[4]在有限理性下应用贝叶斯学习理论完成认知更新, 对个体出发时间的选择行为进行了研究; 陈玲娟等^[5]基于累积前景理论建立了以可接受的最早到达时刻、工作开始时刻及最佳到达时刻为 3 个参考点的到达前景值模型; 黄中祥等^[6]基于累积前景理论分析了在实际路网中, 出行者在不同得失状况下的选择行为; 侯现耀等^[7]通过 SP 调查, 基于 Logit 模型对出行者出发时间选择的影响因素进行了量化分析; 张波等^[8]、殷蒙蒙^[9]分别构建了出发时间选择模型; 姜沂兵等^[10]从出行方式的角度出发, 基于累积前景理论, 以出行方式的期望成本为参考点, 构建了出行方式选择模型; 陈九宇等^[11]通过试验研究出行经验与关键因素信息对出行者出行方式决策的影响, 认为出行者的出行决策受个体经验与出行信息的共同影响; 李小静等^[12]构建了出行者路径选择模型; Zhang 等^[13]考虑出行线路选择及其变化过程, 构建了动态出行路径选择模型。到目前为止, 虽然对基于累积前景理论的出行决策行为的研究取得了丰硕的成果, 但仍存在以下不足: 1) 这些研究成果大多假设所有出行者的参考点都相同, 很少考虑由于出行者的个性化特征所导致的参考点之间的差异性, 也很少根据出行者的风险偏好选择参考点; 2) 目前, 学者们重点研究的是出发时刻、出行方式、出行路径的决策, 很少对结合出行过程的多个决策行为进行研究, 在研究中也很少考虑多个决策间的反馈关系。针对上述问题, 本研究将通勤出行行为作为研究对象, 考虑出行者的风险偏好, 构建在通勤出行中出发时刻选择和路径选择两个决策行为的联合决策模型。

1 联合决策过程

累积前景理论既考虑了出行者的有限理性, 也反映了出行者在出行决策时的风险态度和主观偏好, 与出行者出行决策的实际相符。因此, 累积前景理论较适用于研究出行者的出行决策行为。

影响通勤出行决策的因素众多, 按照其是否具有确定性特征, 将其分为确定性影响因素和不确定性影响因素两类。确定性影响因素主要有出行者特性、出行特性、交通设施服务特性等。其中, 出行者特性包括出行者的职业、年龄、性别、收入、文化水平等; 出行特性包括出行距离、出行的时间意愿等; 交通设施服务特性包括出行费用、出行时间、交通设施的舒适度等。不确定性影响因素主要有出行者的风险偏好、出行时间的可靠性等。本研究根据出行者的个性化特征, 将出行者划分为 m 类。

在出发时刻选择和路径选择的联合决策中, 出行者根据经验信息、实时交通信息、交通环境、路网状况、个人偏好、经济状况等来选择备选方案。备选方案是备选出发时刻与备选路径的组合, 而备选路径隐含了出行方式。根据累积前景理论, 出发时刻选择与路径选择的联合决策过程, 如图 1 所示。

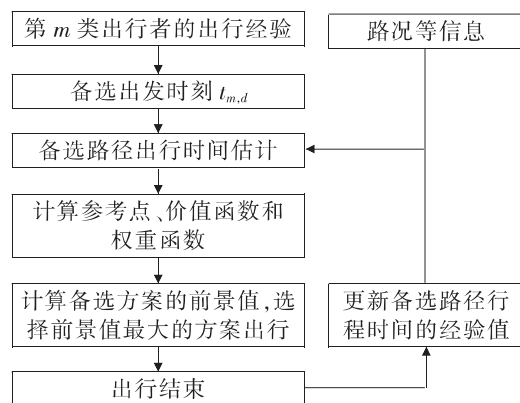


图 1 联合决策过程

Fig. 1 Process of joint decision

在图 1 中, 备选路径出行时间估计是基于贝叶斯理论进行的, 是指出行者在出行前根据当时的交通信息和经验进行的行程时间估计。

在第 i 次出行前, 出行者 m 在选定出发时刻

$t_{m,d}$ 后,根据 $t_{m,d}$ 时刻的路况等交通信息,确定备选路径 r 的感知行程时间为:

$$T_{1,m,r,d,i} = \tau_{1,m,r,d,i} + \epsilon_{1,m,r,d,i} \quad (1)$$

式中: $T_{1,m,r,d,i}$ 、 $\tau_{1,m,r,d,i}$ 、 $\epsilon_{1,m,r,d,i}$ 分别为第 i 次出行前出行者 m 在出发时刻 $t_{m,d}$ 对路径 r 的感知行程时间(路段行程时间模型采用 BPR 模型)、感知行程时间均值和估计误差。假设该估计误差服从 $N(0, \sigma_{1,m,r,d,i})$ 分布,其中 $\sigma_{1,m,r,d,i}$ 为估计误差 $\epsilon_{1,m,r,d,i}$ 的标准差。

同时,出行者也会根据历史经验得到经验行程时间:

$$T_{2,m,r,d,i} = \tau_{2,m,r,d,i} + \epsilon_{2,m,r,d,i} \quad (2)$$

式中: $T_{2,m,r,d,i}$ 、 $\tau_{2,m,r,d,i}$ 、 $\epsilon_{2,m,r,d,i}$ 分别为经验行程时间、经验行程时间均值和估计误差。假设该估计误差服从 $N(0, \sigma_{2,m,r,d,i})$ 分布。

在感知行程时间和经验行程时间的基础上,出行者基于贝叶斯理论可进行行程时间的估计。估计的行程时间为:

$$T_{3,m,r,d,i} = \tau_{3,m,r,d,i} + \epsilon_{3,m,r,d,i} \quad (3)$$

式中: $T_{3,m,r,d,i}$ 、 $\tau_{3,m,r,d,i}$ 、 $\epsilon_{3,m,r,d,i}$ 分别为估计的行程时间、估计的行程时间均值和估计误差。假设该估计误差服从 $N(0, \sigma_{3,m,r,d,i})$ 分布。

因 $T_{3,m,r,d,i}$ 是根据经验对 $T_{1,m,r,d,i}$ 修正后得到的,所以由贝叶斯理论可得:

$$\tau_{3,m,r,d,i} = E(T_{3,m,r,d,i}) =$$

$$\frac{\tau_{1,m,r,d,i}\sigma_{2,m,r,d,i} + \tau_{2,m,r,d,i}\sigma_{1,m,r,d,i}}{\sigma_{1,m,r,d,i} + \sigma_{2,m,r,d,i}} \quad (4)$$

$$\sigma_{3,m,r,d,i} = V(\epsilon_{3,m,r,d,i}) = \frac{\sigma_{1,m,r,d,i}\sigma_{2,m,r,d,i}}{\sigma_{1,m,r,d,i} + \sigma_{2,m,r,d,i}} \quad (5)$$

在出行后,出行者根据本次出行的实际行程时间及经验,对经验行程时间进行更新:

$$T_{4,m,r,d,i} = \tau_{4,m,r,d,i} + \epsilon_{4,m,r,d,i} \quad (6)$$

式中: $T_{4,m,r,d,i}$ 、 $\tau_{4,m,r,d,i}$ 、 $\epsilon_{4,m,r,d,i}$ 分别为更新后的经验行程时间、更新后的经验行程时间均值和估计误差。假设该估计误差服从 $N(0, \sigma_{4,m,r,d,i})$ 分布。因 $T_{2,m,r,d,i+1}$ 是基于经验对 $(T_{2,m,r,d,i}, T_{4,m,r,d,i})$ 得到的,故有:

$$\tau_{2,m,r,d,i+1} = E(T_{2,m,r,d,i+1}) = \frac{\tau_{4,m,r,d,i}\sigma_{2,m,r,d,i} + \tau_{2,m,r,d,i}\sigma_{4,m,r,d,i}}{\sigma_{2,m,r,d,i} + \sigma_{4,m,r,d,i}} \quad (7)$$

$$\sigma_{2,m,r,d,i+1} = V(\epsilon_{2,m,r,d,i+1}) = \frac{\sigma_{1,m,r,d,i}\sigma_{4,m,r,d,i}}{\sigma_{1,m,r,d,i} + \sigma_{4,m,r,d,i}} \quad (8)$$

2 参考点和价值函数的确定

对于通勤出行,出行者希望在最接近工作开始的时刻到达工作地点。备选路径的行程时间估计是出行者到达时间的重要影响因素,也是出行者收益的重要影响因素,故本研究拟增加路径行程时间作为参考点。文献[8]构建了有 2 个参考点的累积前景理论,这 2 个参考点分别为可接受的最早到达时间和工作开始时间。因工作开始时间是定值,出行者不能根据当前信息和历史经验进行调整和更新,故本研究改用可接受的最早和最晚到达时间作为参考点。参照文献[8],可绘制图 2 所示的价值函数和参考点的关系图。

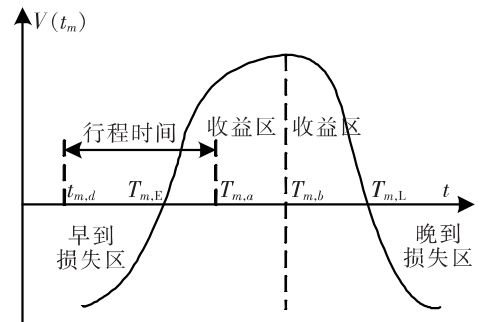


图 2 价值函数与参考点的关系

Fig. 2 Relationship between value function and reference points

图中: $V(t_m)$ 为价值函数; $T_{m,E}$ 、 $T_{m,L}$ 分别为可接受的最早和最晚到达时间; $T_{m,r,a,d}$ 为时刻 $t_{m,d}$ 出发通过路径 r 估计的到达时间,且 $T_{m,r,a,d} = T_{3,m,r,d,i} + t_{m,d}$ 。

在图 2 中, $T_{m,E}$ 、 $T_{m,L}$ 将价值函数分为 3 个区间,即 $(-\infty, T_{m,E}]$ 、 $(T_{m,E}, T_{m,L})$ 、 $[T_{m,L}, +\infty)$ 。若出行者在 $(T_{m,E}, T_{m,L})$ 区间到达,价值函数为正;其余时间到达,价值函数均为负。另外在 $(T_{m,E}, T_{m,L})$ 区间中存在一个极值点,该点为最佳到达时间 $T_{m,b}$,文献[11]称其为伪参考点。因路径行程时间是 $T_{m,b}$ 与 $t_{m,d}$ 之差,故本研究将该伪参考点改为实际参考点,且称其为行程时间参考点。由此,本研究构建了由可接受的最早、最晚到达时间和行程时间组成的 3 参考点体系。

这 3 个参考点均可通过已完成出行的实际值和本次出行经验值的比较获取。其中经验值可由上文的贝叶斯更新方法获取;可接受的最早到达时间可取所有实际值和经验值的最小值;可接受的最晚到达时间可取所有实际值和经验值的最大

值;行程时间则可取所有实际值和经验值的平均值。3 个参考点 $T_{m,E}$ 、 $T_{m,b}$ 、 $T_{m,L}$ 将出行者 m 的可能到达时间划分为 4 个区间,即 $(-\infty, T_{m,E}]$ 、 $(T_{m,E}, T_{m,b})$ 、 $[T_{m,b}, T_{m,L}]$ 、 $[T_{m,L}, +\infty)$ 。

因此,价值函数为:

$$V(T_{m,r,a,d}) = \begin{cases} -\beta^- (T_{m,E} - T_{m,r,a,d})^{\theta_m} + \beta^+ (T_{m,b} - T_{m,r,a,d})^{\theta_m}, & T_{m,r,a,d} < T_{m,E} \\ \beta^+ (T_{m,r,a,d} - T_{m,E})^{\theta_m} + \beta^+ (T_{m,b} - T_{m,r,a,d})^{\theta_m}, & T_{m,E} \leq T_{m,r,a,d} < T_{m,b} \\ \beta^+ (T_{m,L} - T_{m,r,a,d})^{\theta_m} - \beta^- (T_{m,r,a,d} - T_{m,b})^{\theta_m}, & T_{m,b} \leq T_{m,r,a,d} < T_{m,L} \\ -\beta^- (T_{m,r,a,d} - T_{m,L})^{\theta_m} - \beta^- (T_{m,r,a,d} - T_{m,b})^{\theta_m}, & T_{m,L} \leq T_{m,r,a,d} \end{cases} \quad (9)$$

式中: β^+ 、 β^- 为规避系数,根据 Kahneman 等^[14]的研究成果, β^+ 、 β^- 可分别取值为 1.00、2.25; θ_m 为风险偏好系数,由 Kahneman 等^[14]提出,并建议取值为 0.88。但 Kahneman 等^[14]在标定风险系数时,未考虑通勤出行中的各种不确定性。而且因出行者具有个性化特征,出行者对收益或损失的敏感性具有较大差异,这种差异会影响出行者的出行决策,故需进行风险偏好系数的修正。一般地,在其他条件相同时, $(T_{m,E}, T_{m,b})$ 、 $[T_{m,b}, T_{m,L}]$ 区间越小, $T_{m,a}$ 属于这两个区间的概率也越小;同时,出行距离越长, $T_{m,a}$ 越大,不确定性因素引起的风险也越大。由此,风险偏好系数与 3 个参考点的关系可参考文献^[15]表示如下:

$$\theta_{m,r,d} = \left[1 - \frac{1}{\zeta_{m,r,d}} \cdot \min \left(\frac{(T_{m,L} - T_{m,E})}{\sum_m (T_{m,L} - T_{m,E})}, \frac{|T_{m,r,a,d} - T_{m,b}|}{\sum_m |T_{m,r,a,d} - T_{m,b}|} \right) \right]^\varphi \quad (10)$$

式中: $\zeta_{m,r,d}$ 、 $\theta_{m,r,d}$ 分别为出行者 m 在时刻 $t_{m,d}$ 出发通过路径 r 行程时间的可靠度、风险偏好系数; φ 为出行规模系数, $0 < \varphi \leq 1$ 。

3 前景值的计算与决策

在出行过程中,出行者据价值函数的正负确定出行方案是收益还是损失。若 $V(T_{m,r,a,d}) \geq 0$, 该出行方案为收益,否则为损失。因此,出行者的主观概率函数可表示为:

$$P(T_{m,r,a,d}) = \begin{cases} p_{m,r,d}^+(T_{m,r,a,d}), & V(T_{m,r,a,d}) \geq 0 \\ 1 - p_{m,r,d}^+(T_{m,r,a,d}), & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $p_{m,r,d}^+(T_{m,r,a,d}) = P(V(T_{m,r,a,d}) \geq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{3,m,r,d,i}} \int_{T_{m,E}}^{T_{m,L}} \exp \left[-\frac{(V(T_{m,r,a,d}) - V(T_{m,b}))^2}{2(\sigma_{3,m,r,d,i})^2} \right] dt$ 。

权重函数 W 采用常用的函数形式,可表示为如下形式:

$$W(T_{m,r,a,d}) = \begin{cases} w^+(p_{m,r,d}^+) = \frac{(p_{m,r,d}^+)^{\lambda}}{[(p_{m,r,d}^+)^{\lambda} + (1 - p_{m,r,d}^+)^{\lambda}]^{\frac{1}{\lambda}}}, & V(T_{m,r,a,d}) \geq 0 \\ w^-(p_{m,r,d}^-) = \frac{(p_{m,r,d}^-)^{\delta}}{[(p_{m,r,d}^-)^{\delta} + (1 - p_{m,r,d}^-)^{\delta}]^{\frac{1}{\delta}}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: λ 、 δ 为收益、损失参数,根据 Kahneman 等^[14]的标定,可分别取值为 0.61、0.69。

根据价值函数、权重函数可计算得到出行方案的前景值 $f(T_{m,r,a,d})$ 。由图 2 可知,估计到达时间 $T_{m,r,a,d}$ 可能落在 $(-\infty, T_{m,E}]$ 、 $(T_{m,E}, T_{m,b})$ 、 $[T_{m,b}, T_{m,L}]$ 、 $(T_{m,L}, +\infty)$ 这 4 个区间。若 $P(x)$ 、 $V(x)$ 分别为 $T_{m,r,a,d}$ 落在区间 x 的

概率和价值,则出行方案 $(t_{m,d}, r)$ 的前景值 $f(T_{m,r,a,d})$ 为:

$$f(T_{m,r,a,d}) = V(T_{m,r,a,d})W(T_{m,r,a,d}) = \sum_{x=1}^4 V(x)W(P(x)) \quad (13)$$

在计算出所有备选出行方案的前景值后,出行者将选择前景值最大的方案出行。值得注意的

是,在确定出行方案时要对所有路径的前景值进行排序。当路网规模较大、OD 对数量较多时,各起讫点之间的路径数量较多,但并非所有路径都是有效路径。为此,在模型应用过程中,可预先确定各起讫点之间可行的路径集合^[16],在此基础上再基于联合决策模型确定出行方案。

4 算例分析

算例网络如图 3 所示,假设有 1 个 OD 对,从节点①到节点⑨。设出行总需求为 10 000 辆,上班时间为 9:00,研究时间为[7:30,9:00]。因出行者大多习惯选择 10 min 倍数的时刻出发,故将研究时间分为 9 个时长为 10 min 的时段来研究。出行规模系数 φ 为 0.95, $T_{m,E}$ 、 $T_{m,b}$ 、 $T_{m,L}$ 分别为 8:43、8:50、8:53。路段、路径参数见表 1 和表 2。

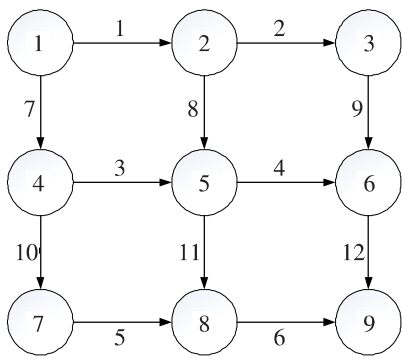


图 3 算例网络

Fig. 3 The example network

表 1 路段参数

Table 1 Section parameters

路段 编号	自由流时 间/min	容量/ ($\times 10^3$ 辆 \cdot h $^{-1}$)	路段 编号	自由流时 间/min	容量/ ($\times 10^3$ 辆 \cdot h $^{-1}$)
1	6	7	7	5	5
2	9	3	8	7	7
3	5	7	9	3	3
4	4	7	10	5	3
5	6	5	11	7	7
6	4	7	12	8	3

表 2 路径参数

Table 2 Route parameters

路径编号	路径组成	自由流时间/min
1	1-2-9-12	26
2	1-8-4-12	25
3	1-8-11-6	24
4	7-3-4-12	22
5	7-3-11-6	21
6	7-10-5-6	20

4.1 风险偏好系数不固定时的联合决策结果

采用式(10)所示的风险偏好计算模型,基于 MATLAB 编程可计算得到不同出发时刻、不同路径的前景值,见表 3 和图 4。

表 3 风险偏好系数不固定时的前景值

Table 3 Prospect values with unfixed risk preference coefficient

出发时间段	路径					
	1	2	3	4	5	6
7:30—7:40	−0.833	−0.832	−0.881	−0.646	−0.519	−0.364
7:40—7:50	−0.715	−0.681	−0.907	−0.506	−0.491	−0.286
7:50—8:00	−0.646	−0.607	−0.654	−0.433	−0.362	−0.206
8:00—8:10	−0.576	−0.457	−0.180	−0.361	−0.246	−0.123
8:10—8:20	0.187	−0.180	0.102	−0.287	−0.186	−0.035
8:20—8:30	0.196	0.202	0.264	0.281	0.406	0.049
8:30—8:40	0.033	0.122	0.240	0.293	0.323	0.124
8:40—8:50	−0.605	−0.140	−0.357	−0.051	0.035	−0.255
8:50—9:00	−0.833	−0.563	−0.632	−0.567	0.049	−0.538

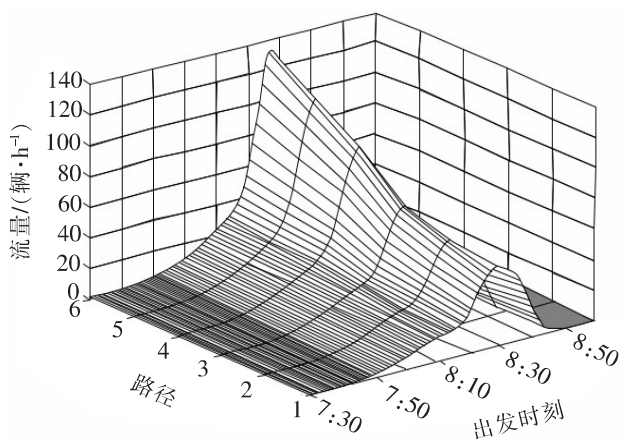


图 4 联合决策结果

Fig. 4 Joint decision results

图 4 即为早高峰通勤出行的联合决策结果。由表 3 和图 4 可知,流量最大值的路径为 8:20—

8:30 出发的路径 6,而最小值的路径为 7:30—7:40 出发的路径 1。较早出发、较晚出发的出行者均较少,中间时段 8:10—8:40 出发的出行者较多,出行高峰期在 8:28 左右,主要是因为太早或太晚出发对出行者来讲均是损失。选择路径 6 出行的出行者最多,主要是因为出行者偏向于选择行程时间最短的路径出行。由以上分析可知,决策结果与出行实际较吻合。

4.2 风险偏好系数固定时的联合决策结果

其他条件相同,采用 Kahneman 建议的风险偏好系数 0.88,基于 MATLAB 编程计算得到不同出发时刻、不同路径的前景值,见表 4。

表 4 风险偏好系数为定值时的前景值

Table 4 Prospect values with fixed risk preference coefficient

出发时间段	路径					
	1	2	3	4	5	6
7:30—7:40	−0.762	−0.654	−0.615	−0.581	−0.546	−0.761
7:40—7:50	−0.691	−0.581	−0.546	−0.407	−0.476	−0.589
7:50—8:00	−0.519	−0.407	−0.476	−0.332	−0.205	−0.317
8:00—8:10	−0.446	−0.332	−0.285	−0.257	−0.133	−0.143
8:10—8:20	−0.472	−0.257	−0.233	−0.180	0.286	0.169
8:20—8:30	−0.195	−0.180	−0.162	0.102	0.418	0.193
8:30—8:40	−0.117	0.102	0.187	0.322	0.211	0.016
8:40—8:50	−0.333	−0.122	0.211	0.140	0.133	−0.136
8:50—9:00	−0.447	−0.040	−0.133	−0.053	0.151	−0.252

由表 3 和表 4 可知,风险偏好系数对出行方案的前景值有显著影响。而且,与风险偏好系数固定为 0.88 相比,在出行高峰期 8:10—8:40,在本研究可变的风险偏好系数下,前景值普遍较大;而在出行低峰期,前景值普遍较小。

4.3 时间可靠度要求的影响分析

在其他条件相同的情况下,将出行者分为高、低可靠度要求的两类人群,其可靠度要求分别为 0.96、0.88。当可靠度要求为 0.96 时, $T_{m,E}$ 、 $T_{m,b}$ 、 $T_{m,L}$ 分别为 8:42、8:45、8:48;当可靠度要求为 0.88 时, $T_{m,E}$ 、 $T_{m,b}$ 、 $T_{m,L}$ 分别为 8:43、8:50、8:57。由此,可计算不同收入人群不同出行方案的前景值,见表 5 和表 6。

对比表 5 和表 6 可知:① 对于不同的可靠度要求,出行方案前景值的变化比较明显,高可靠度要求人群的前景值与低可靠度要求人群的前景值相比,普遍偏大。② 可靠度要求高的人群,出发高峰期相对集中,到达时间也相对集中。③ 可靠度要求高的人群,前景值最大的方案为:8:20—8:30 出发、通过路径 5 出行;可靠度要求低的人群,前景值最大的方案为:8:00—8:10 出发、通过路径 6 出行。说明可靠度要求高的人群偏向于在较晚的时间出发、选择风险较小的路径出行,而可靠度要求低的人群偏向于在较早的时间出发、选择行程时间较短的路径出行。

表5 高可靠度要求人群的前景值

Table 5 Prospect values of high reliability requirement group

出发时间段	路径					
	1	2	3	4	5	6
7:30—7:40	-0.777	-0.669	-0.630	-0.596	-0.561	-0.776
7:40—7:50	-0.706	-0.596	-0.561	-0.422	-0.491	-0.604
7:50—8:00	-0.534	-0.422	-0.491	-0.347	-0.220	-0.332
8:00—8:10	-0.461	-0.347	-0.300	-0.272	-0.148	-0.158
8:10—8:20	-0.487	-0.272	-0.248	-0.195	0.271	0.154
8:20—8:30	-0.210	-0.195	-0.177	0.087	0.403	0.178
8:30—8:40	-0.132	0.087	0.172	0.307	0.196	0.001
8:40—8:50	-0.348	-0.137	0.196	0.125	0.118	-0.151
8:50—9:00	-0.462	-0.055	-0.148	-0.068	0.136	-0.267

表6 低可靠度要求人群的前景值

Table 6 Prospect values of low reliability requirement group

出发时间段	路径					
	1	2	3	4	5	6
7:30—7:40	-0.912	-0.804	-0.765	-0.731	-0.696	-0.911
7:40—7:50	-0.841	-0.731	-0.696	-0.557	-0.626	-0.739
7:50—8:00	-0.669	-0.557	-0.626	-0.482	-0.355	-0.467
8:00—8:10	-0.596	-0.482	-0.435	-0.407	-0.283	0.293
8:10—8:20	-0.622	-0.407	-0.383	-0.330	0.136	0.019
8:20—8:30	-0.345	-0.330	-0.312	-0.047	0.268	0.043
8:30—8:40	-0.267	-0.047	0.037	0.172	0.061	-0.133
8:40—8:50	-0.483	-0.272	0.061	-0.009	-0.016	-0.286
8:50—9:00	-0.597	-0.190	-0.283	-0.203	0.001	-0.402

5 结论

本研究基于累积前景理论构建了出发时刻与路径的联合决策模型。该模型具有3个基于贝叶斯理论更新的参考点,即可接受的最早、最晚到达时间和行程时间。此外,该模型的风险偏好系数是可变的。通过分析本研究的算例,得到如下结论:

1) 当风险偏好系数不固定时,流量最大值点为8:20—8:30出发的路径6,最小值点为7:30—7:40出发的路径1,表明本研究的联合决策模型能较好地表示出行者的决策行为,与出行实际比较吻合。

2) 与风险偏好系数固定为0.88相比,可变的的风险偏好系数下的前景值普遍较大,平均超出20.88%。

3) 可靠度要求高的人群偏向于在较晚的时间

出发、选择风险较小的路径出行;可靠度要求低的人群偏向于在较早的时间出发、选择行程时间较短的路径出行。可靠度要求高的人群与可靠度要求低的人群相比,前景值平均降低了34.8%。

〔参考文献〕

- [1] Katsikopoulos K V, Duseanthy Y, Fisher D L, et al. Risk attitude reversals in drivers' route choice when range of travel time information is provided [J]. Human Factors, 2002, 44(3): 466-473.
- [2] 尚山山. 小汽车通勤者出发时刻选择模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
SHANG Shan-shan. Research on choice model of commuter's departure time[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [3] 张波, 隗志才, 倪安宁. 前景理论在出行行为研究中

- 的适用性[J]. 北京理工大学学报:社会科学版, 2013,15(1):54-62.
- ZHANG Bo, JUAN Zhi-cai, NI An-ning. The applicability of prospect theory in travel behavior research[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition, 2013, 15(1): 54-62.
- [4] 栾琨, 隽志才. 基于 RIPPER 的有限理性下出行路径选择行为[J]. 中国高新技术企业, 2016(12): 11-12.
- LUAN Kun, JUAN Zhi-cai. Trip route choice behavior under bounded rationality based on RIPPER[J]. China High Technology Enterprises, 2016(12): 11-12.
- [5] 陈玲娟, 代炯, 王殿海. 基于出行收益的出发时刻及路径选择模型[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2016, 35(4): 163-167.
- CHEN Ling-juan, DAI Jiong, WANG Dian-hai. Departure time and route choice model based on travel profit[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2016, 35(4): 163-167.
- [6] 黄中祥, 王任映, 况爱武. 基于预算时间的路径选择模型参考点设定方法[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(3): 75-79.
- HUANG Zhong-xiang, WANG Ren-ying, KUANG Ai-wu. Reference point setting method in route choice model based on travel time budget[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(3): 75-79.
- [7] 侯现耀, 陈学武, 曾隽. 公交出行信息条件下出行者通勤出发时间选择影响因素[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2016, 46(4): 893-898.
- HOU Xian-yao, CHEN Xue-wu, ZENG Jun. Influence factors of traveler's commuting departure time choice behavior under public transit information[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(4): 893-898.
- [8] 张波, 隽志才, 林徐勋. 基于累积前景理论的出发时间选择 SDUO 模型[J]. 管理工程学报, 2013, 27(1): 68-76.
- ZHANG Bo, JUAN Zhi-cai, LIN Xu-xun. Stochastic dynamic user optimum model with departure time choice based on cumulative prospect theory[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2013, 27(1): 68-76.
- [9] 殷蒙蒙. 拥堵收费情境下通勤者出发时间选择行为研究: 基于累积前景理论的分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- YIN Meng-meng. Commuter departure time choice behavior under congestion pricing: analysis based on cumulative prospect theory[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [10] 姜沂兵, 孙会君, 王伟. 基于方式选择的拥堵收费及返还优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 142-147, 154.
- JIANG Yi-bing, SUN Hui-jun, WANG Wei. Congestion pricing and refund optimization model based on mode choice[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(1): 142-147, 154.
- [11] 陈九宇, 朱森来. 交通出行方式决策中的锚定效应影响研究[J]. 公路与汽运, 2020(5): 12-16.
- CHEN Jiu-yu, ZHU Sen-lai. Research on the influence of anchoring effect in traffic travel mode decision[J]. Highways & Automotive Application, 2020(5): 12-16.
- [12] 李小静, 刘林忠. 基于累积前景理论的通勤者路径选择模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 174-178.
- LI Xiao-jing, LIU Lin-zhong. Route choice model for commuters based on cumulative prospect theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 174-178.
- [13] Zhang W, He R. Dynamic route choice based on prospect theory[J]. Social and Behavioral Sciences, 2014, 138: 159-167.
- [14] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: an analysis of decisions under risk[J]. Econometrica, 1979, 47: 313-327.
- [15] 王韩麒, 陈红, 冯微. 基于 CPT 的异质通勤者多维出行决策模型[J]. 浙江大学学报:工学版, 2017, 51(2): 298-303.
- WANG Han-qi, CHEN Hong, FENG Wei. Multi-dimensional travel decision model for heterogeneous commuters based on CPT[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(2): 298-303.
- [16] 杨信丰, 刘兰芬, 李引珍, 等. 基于影响度的有效路径集合的确定[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(6): 104-110.
- YANG Xin-fen, LIU Lan-fen, LI Yin-zhen, et al. Determining the efficient paths based on effect degree[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6): 104-110.