

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.018

动态广义出行费用随机用户平衡

李小静, 刘林忠

(兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070)

摘 要: 为描述弹性需求下降级路网中出行者路径选择行为, 为出行者和管理者提供决策参考, 采用行程时间、行程时间可靠性及货币费用的加权和定义动态广义出行费用. 假定在路网随机变化的情况下, 出行者以估计广义出行费用最小为路径选择标准, 建立基于动态广义出行费用的随机用户平衡模型, 并给出求解模型的 MSA 算法. 通过在一个算例路网上测试, 结果表明: 出行者对待风险的不同态度、降级系数和货币费用均对道路流量分配影响显著, 并与经验相吻合, 说明所提出的基于动态广义出行费用的随机用户平衡模型能够真实反映出行者在随机路网中的路径选择行为.

关键词: 交通工程; 随机用户平衡; MSA 算法; 降级路网; 广义出行费用

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)09-0101-06

Dynamic generalized travel cost stochastic user equilibrium

LI Xiaojing, LIU Linzhong

(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: For the sake of describing route choice behavior of travelers under degradable network with elastic demand and providing decision references for travelers and managers, the dynamic generalized travel cost is defined as the weighted sum of travel time, travel time reliability and monetary cost. Due to random variations of road networks, travelers are assumed to choose their optimal routes while their generalized travel costs are minimized. Under those assumptions, a stochastic user equilibrium model based on dynamic generalized travel cost is developed. The MSA (method of successive average) algorithm for the model is also proposed. Through a test on an example road network, numerical results show that travelers' risk attitudes, degradation factor and monetary cost have significant influences on road traffic assignment. It is consistent with practical experiences, so it illustrates that the presented stochastic user equilibrium model based on dynamic generalized travel cost can truly reflect travelers route choice behavior on stochastic road network.

Keywords: traffic engineering; stochastic user equilibrium; MSA algorithm; degradable road network; generalized travel cost

路网容量由于道路施工、交通事故或者天气等原因会随机波动, 使得出行者的行程时间随机变化, 从而导致行程时间可靠性也随机变化. 行程时间和行程时间可靠性是出行者路径选择的主要因素, 但是出行者有时也会将货币费用考虑进来. 经验研究表明行程时间、行程时间可靠性以及货币费用是影响出行者路径选择标准的 3 个最重要的因素^[1]. 关于这 3 个因素的研究有很多, 例如刘海旭等^[2]综合考虑了行程时间和行程时间可靠性, 建立了基于行

程质量的随机用户平衡模型; 冷军强等^[3]定义冰雪条件下的广义出行费用为出行者的行程时间和行程时间可靠性及出行安全性的加权综合. 胡文君等^[4]按照出行时间和出行费用两个准则建立了广义出行阻抗的多用户多模式多准则的随机用户网络均衡模型. 以上均是其中两个因素的运用, 把 3 个因素全部考虑的研究很少见. 由于交通网络的各种随机性和不确定性因素的影响, 城市道路网络中的某路段或路径会造成通行能力下降, 从而导致整体或局部路网的通行能力不同程度的降级. 以往的研究也都是在需求为随机的环境下研究, 从路网降级变化的随机环境研究出行费用的较少. 韦增欣等^[5]研究了弹性需求下降级路网随机用户均衡模型, 但该模型中只考虑了行程时间成本, 只研究了降级不同对流

收稿日期: 2014-12-19
基金项目: 国家自然科学基金(71361018);
兰州交通大学青年基金(2016019)
作者简介: 李小静(1981—), 女, 讲师, 博士;
刘林忠(1963—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 李小静, xjingli990@163.com

量的影响,没有全面考虑其他因素,分析也不够全面. 而现有的研究多是静态网络随机型用户模型,这对于现实来说过于简化,不能很好地用于实践. 鉴于此,本文将全面考虑影响出行者路径选择的 3 个因素,提出“动态广义出行费用”,以估计此费用最小作为路径选择准则,在弹性需求及降级路网条件下建立随机用户平衡.

1 降级路网下的时间分布

设交通网络 $G = (\mathbf{N}, \mathbf{A})$, $\mathbf{N}$ 为网络中节点的集合, $\mathbf{A}$ 为路段集合, 路段 $a \in \mathbf{A}$, $\mathbf{W}$ 表示起讫点 OD 对集合, $\omega \in \mathbf{W}$, $\mathbf{K}_\omega$ 表示起讫点 OD 对 ω 间路径集合, 路径 $k \in \mathbf{K}_\omega$. 路网上的交通需求为交通流量, 交通供给为道路通行能力或称为道路容量, 此两者均为随机变量, 下面介绍其随机分布. 本文规定以下大写字母为随机变量, 小写字母为固定变量.

路段行程时间通常采用 BPR 函数描述, 路段 a 上的行程时间 T_a 为

$$T_a = T_a(x_a, C_a) = t_a^0(1 + \beta(x_a/C_a)^n). \quad (1)$$

式中 t_a^0 、 x_a 、 C_a 分别为路段 a 的自由流行程时间、实际流量、实际通行能力; β 和 n 为确定性参数.

路段通行能力 C_a 为随机变量, 故路段行程时间 T_a 也为随机变量. 本文假设 C_a 服从平均分布, 上界为道路设计容量 $\bar{c}_a$, 下界为 $\bar{\eta}_a \bar{c}_a$. $\bar{\eta}_a$ 为路段 a 通行能力最大降级系数, 即 $C_a \sim U(\bar{\eta}_a \bar{c}_a, \bar{c}_a)$, 其中 $0 < \bar{\eta}_a \leq 1$. $\bar{\eta}_a = 1$ 为理想情况, 本文不考虑此情况. $n > 1$ 时, 假定路段通行能力相互独立, 路段行程时间的均值 t_a 和标准差 σ_t^a 分别为^[6-7]

$$t_a = E(T_a) = t_a^0 + \beta t_a^0 \frac{1 - (\bar{\eta}_a)^{1-n}}{(\bar{c}_a)^n (1 - \bar{\eta}_a) (1 - n)} (x_a)^n. \quad (2)$$

$$\text{var}(T_a) = \beta^2 (t_a^0)^2 \frac{1}{(\bar{c}_a)^{2n}} (x_a)^{2n} \cdot$$

$$\left\{ \frac{1 - (\bar{\eta}_a)^{1-2n}}{(1 - \bar{\eta}_a)(1 - 2n)} - \left[\frac{1 - (\bar{\eta}_a)^{1-n}}{(1 - \bar{\eta}_a)(1 - n)} \right]^2 \right\}, \quad (3)$$

$$\sigma_t^a = \sqrt{\text{var}(T_a)} = \beta t_a^0 \frac{1}{(\bar{c}_a)^n} (x_a)^n \cdot$$

$$\sqrt{\left\{ \frac{1 - (\bar{\eta}_a)^{1-2n}}{(1 - \bar{\eta}_a)(1 - 2n)} - \left[\frac{1 - (\bar{\eta}_a)^{1-n}}{(1 - \bar{\eta}_a)(1 - n)} \right]^2 \right\}}. \quad (4)$$

由上面假设可知路段行程时间也是独立的, 故 ω 间有效路径的出行时间就是与该路径相关联的所有路段的行程时间和, 可以表示为

$$T_k^\omega = \sum_{a \in \mathbf{A}} \delta_{k,a}^\omega T_a, \quad \forall k \in \mathbf{K}_\omega, \omega \in \mathbf{W}. \quad (5)$$

式中: $\delta_{k,a}^\omega$ 为路段-路径关联系数, 如果路段 a 在路径 k 上, $\delta_{k,a}^\omega = 1$; 否则为 0.

根据中心极限定理, 不论路段行程时间分布如何, 路径行程时间均服从正态分布 $T_k^\omega \sim N(E(T_k^\omega), (\sigma_k^\omega)^2)$, 路径行程时间均值 t_k^ω 和标准差 σ_k^ω 分别为

$$t_k^\omega = E(T_k^\omega) = \sum_{a \in \mathbf{A}} \delta_{k,a}^\omega t_a, \quad \forall k \in \mathbf{K}_\omega, \omega \in \mathbf{W}; \quad (6)$$

$$\sigma_k^\omega = \sqrt{\sum_{a \in \mathbf{A}} \delta_{k,a}^\omega (\sigma_t^a)^2}, \quad \forall k \in \mathbf{K}_\omega, \omega \in \mathbf{W}. \quad (7)$$

2 动态广义出行费用

2.1 行程时间和行程时间可靠性

降级路网上的路段行程时间由式(1)可转变为

$$T_a = t_a^0 \{1 + \beta[x_a/(\eta_a \bar{c}_a)]^n\}. \quad (8)$$

式中 η_a 为路段 a 受到外界因素影响后的通行能力的实际降级参数. 该系数越大, 说明实际通行能力越大. 一般有 $\eta_a \geq \bar{\eta}_a$, 表示路段实际降级后的通行能力大于等于最大降级后的通行能力. 上式表明路段行程时间与路段实际流量以及实际降级系数有关, 随着流量和降级系数的变化而变化.

Asakura 等^[8]首次提出行程时间可靠性的概念, 该指标可以反映行程时间波动性. 行程时间可靠性是指在一定条件下, 出行者所用实际行程时间小于等于规定时间阈值的概率. 路段或路径行程时间可靠性 R 可以表示为

$$R = P\{X \leq Y\}. \quad (9)$$

式中: P 为概率计算; X 为实际行程时间; Y 为规定的时间阈值.

假设路段行程时间也服从正态分布, 则路段或路径的行程时间可靠性又可以进一步表示为^[9]

$$R = \Phi\left[\frac{Y - \mu_X}{\sigma_X}\right]. \quad (10)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; μ_X 、 σ_X 分别为路段或路径的行程时间均值和标准差, 都是与流量相关的函数, 故 R 也是与流量相关的函数, 随着实际流量的变化而变化.

2.2 动态广义出行费用

出行者除了考虑行程时间以及其波动外, 还会考虑出行中的一些货币支出. 总的出行费用不仅包括出行者的行程时间机会成本和行程时间不可靠负效用所产生的费用, 也包括道路上因维护、油耗等产生的各种货币费用支出. 出行者在降级路网条件下最理想的目标是选择行程时间最小, 行程时间可靠性最高, 并且货币费用最少的路径作为出行依据, 但是这 3 个目标间难免有冲突, 相互矛盾, 不能同时满

足.例如要减少行程时间,往往需要经过一些收费路段;又如要提高行程时间可靠性,必须走行程时间较高的路径,或者还要支付一定的货币费用.出行者需要在这3个目标中寻求一个折中方案,因此可定义这三者的加权综合,用广义出行费用来描述.路段 a 的广义出行费用 m_a 可表示为

$$m_a = \omega_1 \varphi T_a + \omega_2 \tau (1 - R_a) + \omega_3 \lambda_a. \quad (11)$$

式中: T_a 为路段 a 的行程时间; R_a 为路段 a 的行程时间可靠性; λ_a 为路段 a 上的货币费用; φ 为时间价值系数,可以将时间转换为费用; τ 为行程时间可靠性价值系数,可以将不可靠负效用转化为费用; τ/φ 为可靠性比率,可靠性价值一般大于时间价值^[10],所以 $\tau/\varphi > 1$; $\omega_1 \varphi T_a$ 为时间机会成本费用; $\omega_2 \tau (1 - R_a)$ 为不可靠负效用费用; $\omega_3 \lambda_a$ 为货币费用, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 这3个权重系数反映了出行者对待风险的态度, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$; ω_1 越大,说明出行者偏好以行程时间作为路径选择标准; ω_2 越大,说明出行者为风险规避型,趋向于以行程时间可靠性为路径选择标准; ω_3 越大,说明出行者趋向于以出行货币费用为路径选择准则.

OD 对 ω 间路径 k 的广义出行费用 m_k^ω 为

$$m_k^\omega = \sum_{a \in A} \delta_{k,a}^\omega m_a = \omega_1 \varphi \sum_{a \in A} \delta_{k,a}^\omega T_a + \omega_2 \tau \sum_{a \in A} \delta_{k,a}^\omega (1 - R_a) + \omega_3 \sum_{a \in A} \delta_{k,a}^\omega \lambda_a. \quad (12)$$

因路段流量的变化,各路段或路径的行程时间和行程时间可靠性都会随之而变化,故广义出行费用并非静态不变,而是动态变化的,所以用“动态广义出行费用”可以更贴切描述这一概念.因为 T_a 为 x_a 的严格单调递增函数, $1 - R_a$ 为严格单调递增函数,所以路段和路径动态广义出行费用均为流量的严格单调递增函数.

3 广义出行费用随机用户平衡模型

3.1 随机用户平衡条件

在实际出行中,出行者对路网状况不可能完全了解,因此出行者估计的路径广义出行费用是一个随机变量.假定出行者以估计广义出行费用最小为路径选择准则,对于某一出行者,每条路径均有一个被选择的概率.假设估计广义出行费用与实际广义出行费用存在一个随机误差,相互独立并服从 Gumbel 分布.根据离散模型理论^[11],OD 对 ω 间的路径 k 被选择的概率 P_k^ω 为

$$P_k^\omega = \frac{\partial E[\min_{k \in K_\omega} M_k^\omega | m^\omega]}{\partial m_k^\omega}. \quad (13)$$

式中 M_k^ω, m_k^ω 分别为 OD 对 ω 间的路径 k 的估计广

义出行费用和实际广义出行费用; m^ω 为 m_k^ω 的向量表示.上式还可以表示为

$$P_k^\omega = \exp(-\theta m_k^\omega) / \sum_{r \in K_\omega} \exp(-\theta m_r^\omega). \quad (14)$$

式中 θ 为出行者对路径的熟悉程度, θ 越大表示出行者对路况越熟悉.

出行者的路径选择最终将达到 Logit 随机用户平衡,即任何一个出行者都不可能通过单方面改变出行路径来减少自己的估计广义出行费用,但某个 OD 对间所有已被选用的路径上,并不一定有相同的实际广义出行费用,而只满足

$$f_k^\omega = q_\omega P_k^\omega, \quad \forall k, \omega. \quad (15)$$

式中 f_k^ω 为 OD 对 ω 间路径 k 上的交通量; q_ω 为 OD 对 ω 间的交通量.

假定出行者的 OD 交通量 q_ω 是关于 OD 对 ω 间期望最小出行费用 S_ω 的严格单调递减函数,用 $D_\omega(\cdot)$ 表示,并且具有上限 $\bar{q}_\omega$,则可表示为

$$q_\omega = D_\omega(S_\omega) \leq \bar{q}_\omega. \quad (16)$$

用 $D_\omega^{-1}(\cdot)$ 表示 OD 交通量反函数,则期望最小出行费用 S_ω 可表示为

$$S_\omega = D_\omega^{-1}(q_\omega) = E[\min_{k \in K_\omega} M_k^\omega | m^\omega] = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_{k \in K_\omega} \exp(-\theta m_k^\omega). \quad (17)$$

3.2 模型的建立

可采用下面的数学规划模型:

$$\begin{aligned} \min Z(x, f, q) = & \frac{1}{\theta} \sum_{\omega \in W} \sum_{k \in K_\omega} f_k^\omega \ln f_k^\omega - \frac{1}{\theta} \sum_{\omega \in W} q_\omega \ln q_\omega + \\ & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} m_a(\omega) d\omega - \sum_{\omega \in W} \int_0^{q_\omega} D_\omega^{-1}(\omega) d\omega. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K_\omega} f_k^\omega = q_\omega, \quad \forall \omega \in W; \quad (19)$$

$$x_a = \sum_{\omega \in W} \sum_{k \in K_\omega} f_k^\omega \delta_{k,a}^\omega, \quad \forall a \in A; \quad (20)$$

$$f_k^\omega \geq 0, q_\omega \geq 0, \quad \forall k \in K_\omega, \forall \omega \in W. \quad (21)$$

式(18)为目标函数;式(19)、(20)分别为路径流量和路段流量守恒约束条件;式(21)为流量非负约束.

由 Kuhn-Tucker 一阶最优性条件容易证明该模型同时满足 SUE 条件和需求函数,是弹性需求下的 SUE 模型.又该模型中 $m_a(\omega)$ 为路段流量的严格单调递增函数,所以目标函数是关于流量的严格凸函数.模型的约束构成的集合为凸集,根据最优化理论,定义在凸集上的严格凸函数,其最优解唯一^[12].

3.3 模型的求解算法

利用 MSA 算法求解模型,步骤如下:1)初始化.基于零流计算路段广义出行费用 $\{m_a^{(0)} =$

$m_a(0)\}(\forall a)$, 计算 $S_\omega^{(0)}$ 和 $q_\omega^{(0)}(\forall \omega)$. 依次对 $q_\omega^{(0)}(\forall \omega)$ 在路网上进行随机分配, 得到各路段的初始流量 $\{x_a^{(1)}\}(\forall a)$, 令循环次数 $l = 1, 2)$ 更新. 根据 $t_a^{(l)} = t_a(x_a^{(l)})$ 和 $R_a^{(l)} = R_a(x_a^{(l)})$ 修改路段行程时间和行程时间可靠性. 然后根据 $m_a^{(l)} = m_a(x_a^{(l)})$ 改变路段动态广义出行费用 $\{m_a^{(l)}\}(\forall a)$, 继而改变路径动态广义出行费用 $\{m_k^{\omega(l)}\}, \forall \omega, k, 3)$ 方向寻找. 根据各路径当前广义出行费用 $\{m_k^{\omega(l)}\}$, 计算 $S_\omega^{(l)}$ 和 $q_\omega^{(l)}(\forall \omega)$. 在路网上依次对 $q_\omega^{(l)}(\forall \omega)$ 进行随机分配, 得到各路段的附加交通流量 $\{y_a^{(l)}\}, \forall a, 4)$ 移动. 用加权平均法得到新的路段交通量: $x_a^{(l+1)} = x_a^{(l)} + \frac{1}{l}(y_a^{(l)} - x_a^{(l)}), \forall a, 5)$ 收敛性检验. 如果满足 $\sqrt{\sum_{a \in A} (x_a^{(l+1)} - x_a^{(l)})^2} / \sum_{a \in A} x_a^{(l)} < \varepsilon$ (ε 为预先设定的精度), 算法停止; 否则令 $l = l + 1$, 返回第 2) 步继续迭代计算.

4 算例分析

4.1 算例网络

图 1 为算例网络, 包括 2 个 OD 对 (Q_{12}, Q_{56}) 4 条路径和 7 条路段. 令参数 $\tau = 1.5\varphi, \varphi = 1, \theta = 1$; BPR 函数中的参数 $\beta = 0.15, n = 4$; 规定时间阈值 $Y = 30 \text{ min}$, $\varepsilon = 0.001$. 假设 OD 流量为 $q_\omega = \bar{q}_\omega - 1.5S_\omega, \bar{q}_{12} = \bar{q}_{56} = 50 \text{ veh} \cdot \text{min}^{-1}$. 各路段的属性见表 1.

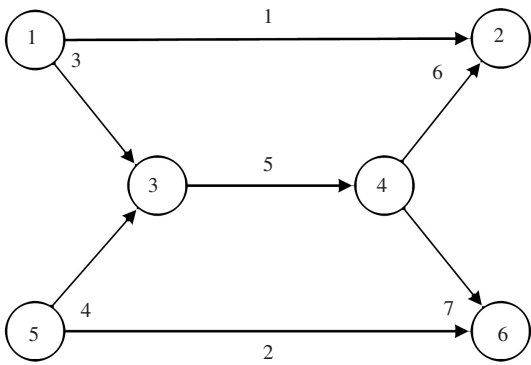


图 1 算例网络

Fig.1 Example network

初始路网条件假定 3 个出行指标权重分别为 $\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.5, \omega_3 = 0.2$; 7 个路段的实际降级系数分别为 0.9、0.9、0.6、0.7、0.9、0.6、0.7; 7 个路段的货币费用分别为 16、10、0、3、0、0、5. 根据这些参数设置, 可得到平衡配流结果. 平衡时路段上的流量 $x_1 = 29.742\ 4, x_2 = 27.181\ 5, x_3 = 10.405\ 4, x_4 = 12.622\ 3, x_5 = 23.027\ 7, x_6 = 10.405\ 4, x_7 = 12.622\ 3$. 循环次数 $l = 6$. 平衡时的各路径流量 p_i 及广义出行费用 m_i 见表 2.

表 1 路段属性

Tab.1 Section properties

路段编号	t_a^0/min	$\bar{c}_a/(\text{veh} \cdot \text{min}^{-1})$	$\bar{\eta}_a$
1	10	40	0.1
2	15	40	0.1
3	7	40	0.1
4	6	40	0.1
5	10	80	0.1
6	8	50	0.1
7	4	50	0.1

表 2 路径平衡配流结果

Tab.2 Equilibrium assignment results of path

路径编号	路径构成	$p_i/(\text{veh} \cdot \text{min}^{-1})$	$m_i/\text{元}$	$q_\omega/(\text{veh} \cdot \text{min}^{-1})$
1	1	29.742 4	6.864 2	40.147 8
2	3—5—6	10.405 4	7.927 5	40.147 8
3	4—5—7	12.622 3	7.960 1	39.803 8
4	2	27.181 5	7.176 5	39.803 8

从平衡配流结果可知, 在设定的初始路网条件下, 因为路径 1 和路径 4 具有较小的自由流行程时间和较大的实际通行能力, 虽然货币费用较高, 但考虑到多数出行者受此费用影响较小而设定较小的权重, 因此具有较低的广义出行费用, 故流量分配较大.

4.2 参数灵敏度分析

模型中的指标权重可以体现出出行者对行程时间、行程时间可靠性以及货币费用的不同风险偏好程度和选择标准; 路段的实际降级系数是路段在某一假设条件下的降级程度, 影响着路段的行程时间, 进而会造成流量的变化, 最后会导致行程时间可靠性的变化; 货币费用为实际路网中的路段货币费用, 本文假设是固定值, 与流量等没有关系, 根据经验货币费用的变化也会影响出行者出行行为. 根据本文假设, 三者之间没有相关性. 故下面将对这 3 个参数分别取不同值进行灵敏度分析, 其他参数取值与初始假定相同, 通过平衡分配结果来验证出行者路径选择行为是否与经验相符.

1) 指标权重影响. 指标权重取不同值时的平衡分配结果如表 3 所示.

从表 3 可以看出: ω_1 较大时, 出行者趋向于以行程时间为选择标准, 因路径 1 的行程时间最小, 故几乎分配了 q_{12} 所有的流量; 路径 4 的行程时间也较小, 故分配了 q_{56} 的 95.3% 流量. ω_2 较大时, 出行者偏好以行程时间可靠性为选择依据, 路径 1、4 分配流量稍大, 路径 2、3 稍小. 这是因为出行者基于可靠性考虑时会选择路段数较少且降级后通行能力较大的路径 1、4; 而路径 2、3 降级后通行能力稍小并且路段数较多, 故可靠性较小, 流量较少. ω_3 较大

时,出行者偏好以货币费用为选择标准. 路径 1 的费用最高,所以流量几乎为 0,路径 2 由于费用为 0,分配了几乎全部的流量;路径 3 上费用略小于路径

4 的,分配了 69.4% 的流量. 由此可见,3 个权重系数对道路流量分配影响显著. 权重系数组合不同对应不同的分配结果,并且与经验相符.

表 3 不同权重的平衡分配结果

Tab.3 Equilibrium assignment results with different weights													
ω_1	ω_2	ω_3	l	$q_{12} /$	$q_{56} /$	路径流量/(veh · min ⁻¹)				路径广义出行费用/元			
				(veh · min ⁻¹)	(veh · min ⁻¹)	p_1	p_2	p_3	p_4	m_1	m_2	m_3	m_4
0.8	0.1	0.1	4	33.974 9	29.392 6	33.971 8	0.003 1	1.380 6	28.012 0	10.641 1	20.000 0	16.800 0	13.748 3
0.1	0.8	0.1	4	45.952 1	45.870 5	24.291 9	21.660 2	19.324 5	26.545 9	3.339 1	3.435 9	3.614 9	3.298 3
0.1	0.1	0.8	4	43.304 7	37.463 4	0.003 9	43.300 7	25.997 9	11.465 4	13.800 0	4.357 1	8.708 6	9.548 8

2)实际降级系数影响. 路段的实际降级系数取值组合假设分为表 4 中的 5 种. 实际降级系数取不同组合时的随机平衡分配结果如表 5 所示.

从表 5 可知:当路段实际降级系数取组合 1,即都不严重时,路径 1、4 的流量明显高于路径 2、3 的. 这是由于路径 1、4 的行程时间最小,可靠性也最高,即使货币费用高也不影响出行者选择该路段出行. 当取组合 2 时,4 条路径均受降级影响流量减少,两个 OD 对的流量也急剧下降. 此时路径 1、4 仍因行程时间小且路段数较少而具有很大的可靠性,故流量分配比较大. 当取组合 3 仅路段 1 降级严重时,路径 1 的流量最少,只占到 17.67%. 当取组合 4 路段 1、2 降级严重时,路径 1、4 受此影响流量最少. 当取组合 5 时,路径

2、3、4 均受降级影响流量最少. 由此可见,5 种组合所表示的各种路径受实际降级系数影响情况的分配结果都是降级严重路径分配流量少,降级不严重路径分配流量多,此结果与经验相吻合.

表 4 路段实际降级系数组合

Tab.4 Combinations of section degradation factor							
组合	η_1	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6	η_7
1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
3	0.1 ↓	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
4	0.1 ↓	0.1 ↓	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
5	0.9	0.1 ↓	0.9	0.1 ↓	0.1 ↓	0.9	0.1 ↓

注: ↓ 表示参数值为下降趋势, ↑ 表示参数值为上升趋势(以下同).

表 5 不同实际降级系数组合的平衡分配结果

Tab.5 Equilibrium assignment results with different combinations of degradation factor											
组合	l	$q_{12} /$	$q_{56} /$	路径流量/(veh · min ⁻¹)				路径广义出行费用/元			
		(veh · min ⁻¹)	(veh · min ⁻¹)	p_1	p_2	p_3	p_4	m_1	m_2	m_3	m_4
1	6	40.154 4	39.808 8	29.671 5	10.482 9	12.673 3	27.135 5	6.862 0	7.917 3	7.954 7	7.174 9
2	2	20.950 2 ↓	18.095 0 ↓	16.191 0 ↓	4.759 2 ↓	1.258 2 ↓	16.836 7 ↓	6.200 0	7.517 3	8.091 8	6.500 0
3	10	38.114 4	39.727 9	6.734 1 ↓	31.380 4	11.673 2	28.054 7	10.023 1	8.332 7	8.113 5	7.207 0
4	11	37.890 1	37.773 4	6.841 8 ↓	31.048 3	31.655 2	6.118 2 ↓	9.968 5	8.533 2	8.571 6	10.242 4
5	35	39.400 1	18.434 4	36.976 6	2.423 5 ↓	9.675 4 ↓	8.759 0 ↓	7.162 1	9.886 2	21.968 5	21.785 5

3)货币费用影响. 路段的货币费用取值组合见表 6,不同组合对应的平衡分配结果见表 7.

表 6 路段货币费用组合

Tab.6 Combinations of section monetary cost							
组合	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
0	16	10	0	3	0	0	5
1	18	12	2	5	2	2	7
2	13	7	0	0	0	0	2
3	10 ↓	10	0	3	0	0	5
4	30 ↑	10	0	3	0	0	5
5	10 ↓	5 ↓	0	3	0	0	5
6	18 ↑	12 ↑	0	3	0	0	5
7	13 ↓	7 ↓	0	0 ↓	0	0	5
8	18 ↑	12 ↑	0	5 ↑	0	0	5

从表 7 可以观察到:与组合 0 初始参数分配结果相比:当组合 1 所有路段货币费用均增大时,路径

2、3 由于费用增加较多,使得流量分别转向路径 1、4;当取组合 2 路段费用大于 0 的均减少时,因路径 2 费用不变,路径 3 减少的费用最多,故路径 2 的流量减少,路径 3 的增加,并因为费用的整体减少使两个 OD 对的流量均增加;组合 3 时,路径 2 的流量向路径 1 转移,反之取组合 4 时,路径 1 的流量又急剧向路径 2 移动. 当取组合 5 时,路段 1、2 费用减少,使路径 1、4 流量增加,反之取组合 6 时,流量减少. 组合 7 时因路径 1、3、4 费用减少,故流量增加,反之取组合 8 时流量减少. 组合 1~8 所体现的 1 条、2 条、3 条、4 条路径受货币费用减少或增加时的流量变化与组合 0 的初始分配结果对比显示:货币费用减少使得流量向该路径转移,反之货币费用增大,流量向其他路径转移,分配结果与事实相符,这充分说明货币费用对出行者的路径选择行为同样具有一定影响.

表 7 不同货币费用组合的平衡分配结果

Tab.7 Equilibrium assignment results with different combinations of monetary cost

组合	l	$q_{12} /$	$q_{56} /$	路径流量/(veh · min ⁻¹)				路径广义出行费用/元			
		(veh · min ⁻¹)	(veh · min ⁻¹)	p_1	p_2	p_3	p_4	m_1	m_2	m_3	m_4
0	6	40.147 8	39.803 8	29.742 4	10.405 4	12.622 3	27.181 5	6.864 2	7.927 5	7.960 1	7.176 5
1	4	39.263 8	38.842 1	32.014 2 ↑	7.249 6 ↓	9.244 2 ↓	29.598 0 ↑	7.337 8	8.838 5	8.840 0	7.667 0
2	5	40.709 4 ↑	41.030 2 ↑	33.189 2	7.520 2 ↓	16.645 8 ↑	24.384 4	6.382 2	7.892 9	6.883 3	6.495 7
3	6	41.377 8	39.837 6	35.564 7 ↑	5.813 1 ↓	12.943 1	26.894 5	5.887 8	7.722 5	7.914 2	7.167 1
4	6	37.800 4	39.712 6	13.161 7 ↓	24.638 7 ↑	11.823 4	27.889 2	9.208 5	8.548 9	8.080 7	7.200 6
5	4	41.403 6	40.754 8	34.995 1 ↑	6.408 5	9.120 8	31.634 0 ↑	5.860 6	7.565 3	7.622 2	6.360 7
6	4	39.750 6	39.417 9	27.348 8 ↓	12.401 8	14.564 2	24.853 8 ↓	7.200 2	8.000 0	8.055 5	7.507 0
7	6	40.759 2	40.699 0	32.908 0 ↑	7.851 2	13.121 6 ↑	27.577 4 ↑	6.371 3	7.834 1	7.349 7	6.589 9
8	5	39.757 6	39.197 1	27.308 1 ↓	12.449 5	12.251 2 ↓	26.945 9 ↓	7.199 5	7.991 3	8.376 6	7.568 3

5 结 论

1)在路网随机降级及需求为弹性的环境下,全面考虑了路网上影响出行者路径选择行为的3大重要指标:行程时间、行程时间可靠性和货币费用。

2)构造了这3个指标的动态广义出行费用的随机用户平衡模型,并设计了求解算法。算例数值结果与所设定的参数有关,但不同参数取值对应的数值结果的变化与日常经验或事实相吻合,这足以证明所建模型的有效性以及算法的正确性。同时也验证了出行者对待风险的不同态度、实际降级系数和货币费用对出行者的路径选择行为具有显著的影响。

3)需要进一步研究的是将规定的时间阈值和货币费用均考虑为流量或时间分布的动态函数,研究更广泛的广义出行费用的动态随机平衡分配模型;还可以研究多类型出行者建立多用户随机均衡模型。

参考文献

[1] WANG J Y T, EHRGOTT M, CHEN A. A bi-objective user equilibrium model of travel time reliability in a road network [J]. Transportation Research Part B, 2014, 66(8): 4-15.

[2] 刘海旭, 蒲云. 基于行程质量的随机用户平衡分配模型 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 93-95, 118.

LIU H X, PU Y. Stochastic user equilibrium assignment model based on travel trait [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 93-95, 118.

[3] 冷军强, 冯雨芹, 张亚平, 等. 广义出行费用下的冰雪条件路网容量可靠性 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(2): 92-97.

LENG J Q, FENG Y Q, ZHANG Y P, et al. Road network capacity reliability based on generalized travel cost under ice and snowfall conditions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011,

43(2): 92-97.

[4] 胡文君, 周溪召. 多用户多模式多准则随机用户均衡模型 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(2): 366-369, 373.

HU W J, ZHOU X Z. A multi-user multi-mode multi-criteria stochastic user equilibrium model [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(2): 366-369, 373.

[5] 韦增欣, 石婷, 高苏奎. 弹性需求下降级路网随机用户均衡模型及算法 [J]. 统计与决策, 2012(7): 79-81.

WEI Zengxin, SHI Ting, GAO Suluan. Stochastic user equilibrium model and algorithm of degraded road network with elastic demand [J]. Statistics and Decision, 2012(7): 79-81.

[6] 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.

[7] LO H K, TUNG Y K. Network with degradable links: capacity analysis and design [J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(4): 345-363.

[8] ASAKURA Y, KASHIWADANI M. Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow [C] //Proceedings of the 19th PTRC Summer Annual Meeting. Victoria: ARRB Group Limited, 1991: 73-84.

[9] 况爱武, 黄中祥, 况群. 随机需求道路网络出行时间可靠性评估方法 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(5): 861-867.

KUANG A W, HUANG Z X, KUANG Q. Evaluation method for travel time reliability of road network with stochastic demand [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(5): 861-867.

[10] LAM T C, SMALL K A. The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment [J]. Transportation Research Part E, 2001, 37(2): 231-251.

[11] BEN-AKIVA M, LERMAN S R. Discrete choice analysis: theory and application to travel demand [M]. Cambridge: MIT Press, 1985: 100-129.

[12] SHEFFI Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1985: 262-342.