

交通信息条件下道路和停车选择 SUE 模型及算法^①

四兵锋¹, 林兴强²

(1. 北京交通大学交通运输学院系统科学研究所, 北京 100044;

2. 香港理工大学土木工程系, 中国 香港)

摘要: 考虑交通信息系统(advanced traveler information system, ATIS)对出行者道路和停车选择行为的影响, 并将出行者分成两类: 一类出行者使用 ATIS, 另一类不使用 ATIS. 在此基础上, 构造了一个基于概率的随机用户均衡模型来描述 ATIS 条件下的道路和停车选择问题, 并给出了相应的求解算法. 最后, 通过一个算例分析了模型及算法的使用效果.

关键词: 交通信息系统; 随机用户均衡; 优化模型; 求解算法

中图分类号: U491.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-9807(2007)02-0019-07

0 引言

先进的交通信息系统 ATIS 是一种降低拥挤、改善交通的有效方法, 因此国内外一些专家学者对 ATIS 的研究很多^[1~5]. 其中 ATIS 对出行者交通选择行为的影响是一项重要的研究内容, 目前国内外一些专家对此问题比较关注. 文献[2]考虑了出行者的道路选择行为, 将出行者分成了两类: 一类装备了 ATIS, 另一类没有装备 ATIS. 并假定装备 ATIS 的出行者可以得到准确的道路信息, 以标准 UE 原则进行道路选择, 而另一类出行者则无法得到准确的道路信息, 以随机方式进行道路选择. 文献[6]对 ATIS 环境下的动态选择模型进行了研究, 在其模型中, 假定出行者采用贝叶斯方法, 根据 ATIS 提供的交通信息和出行经验更新道路运行时间预测, 并使用意识运行时间效用函数做出出行选择决策. 文献[7]将出行者分为怀疑保守型和信任乐观型两类, 在此基础上, 建立了一个随时间演进的随机用户均衡模型来描述 ATIS 条件下的道路选择问题. 在已有的这些研究中, 只考虑了出行者的道路选择问题, 对出行者的停车选

择问题研究较少.

国内外学者对停车选择问题取得了一些研究成果, 文献[8]考虑了停车配流问题, 提出一种停车费用评估函数, 并采用基于 Logit 的随机配流模型来描述停车配流问题. 文献[9]将停车费用当作停车场的属性进行研究, 只考虑了出行者对路径选择时的随机因素, 而没有考虑出行者对停车选择时的随机因素. 文献[10]同时考虑了出行者的道路和停车选择问题, 在其模型中, 假定出行者从起点到停车场选择最短路径, 如果有多条路径到达同一个停车场, 那么出行者的路径选择则采取随机方式. 文献[11]同时考虑了出行者的道路选择和停车选择问题, 建立了一个随机用户均衡配流模型, 但在其模型中没有考虑装备 ATIS 的出行者和未装备 ATIS 的出行者之间的分离关系.

在现实的交通环境中, 不管出行者是否装备 ATIS, 一般都无法得到完全准确的交通信息, 总有一些不确定的随机因素影响出行者的交通选择. 因此, 交通网络中的出行者都是以随机用户均衡模式进行出行方式的选择, 只不过装备 ATIS 的出行者对出行费用的理解误差较小而已. 另外, 在对

① 收稿日期: 2005-02-28; 修订日期: 2006-03-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70631001); 国家 973 计划资助项目(2006CB705500); 北京交通大学科技基金资助项目(2003RC014; 2004SM020).

作者简介: 四兵锋(1972-), 男, 河北邢台人, 博士, 副教授. Email: sibf@263.net.

ATIS 的研究中,有一个重要的因素就是 ATIS 的市场占有率问题,即装备 ATIS 的出行者在总的出行者中所占的比例.以前的研究表明^[12],并不是整个交通网络的拥挤是随着 ATIS 的占有率的增加而持续降低的,只是在一定范围内可以降低交通网络的拥挤程度.因此,在研究 ATIS 对交通网络的影响时,必须考虑装备 ATIS 的出行者和未装备 ATIS 的出行者之间的分离关系.

本文将出行者分为两类,即装备 ATIS 的出行者和未装备 ATIS 的出行者,并假定装备 ATIS 的出行者可以得到比较准确的交通信息,具有较小的出行费用的理解方差;而未装备 ATIS 的出行者则具有较大的出行费用的理解方差,基于 Logit 模型构造了这两类出行者之间的分离关系,在此基础上,提出了一个基于概率的随机用户均衡模型来描述 ATIS 条件下的道路和停车选择问题.并给出了求解随机用户均衡模型的算法,最后通过一个算例验证了模型及算法的有效性.

1 ATIS 条件下的道路和停车选择问题

考虑一个交通网络 $G = ((N, I), A)$, 其中: N 表示网络的节点集合; I 表示网络中的停车场集合; A 表示网络中的路段集合,包括道路、停车路段以及步行路段等. K_{ri} 表示从起点 $r \in O$ 到停车场 $i \in I$ 之间的所有路径的集合,其中 O 表示交通网络中所有起点的集合, I_s 表示和终点 $s \in D$ 相连的所有停车场的集合, D 表示交通网络中所有终点的集合.假定路段 $a \in A$ 上的可测量费用是其流量 x_a 的单调递增的严格凸函数,停车场 $i \in I$ 中的可测量费用是其停车流量 y_i 的单调递增严格凸函数,即

$$t_a = t_a(x_a), \quad t_i = t_i(y_i) \quad (1)$$

一般来说,在城市交通中,出行者从起点到终点的出行过程是由 3 部分组成的,即 1) 从起点到停车场, 2) 寻找停车位和 3) 从停车场步行到终点.相应的,出行者从起点到终点的出行过程所发生的总可测量费用 C_{ki}^s 也是由 3 部分组成的,即

$$C_{ki}^s = c_k^i + t_i + w_{is} \quad (2)$$

其中: c_k^i 表示从起点 $r \in O$ 到停车场之间的路径

$k \in K_{ri}$ 上的出行费用, t_i 表示出行者在停车场 $i \in I$ 找到停车位的费用, w_{is} 表示从停车场 $i \in I$ 到终点 $s \in D$ 的步行费用,其中 c_k^i 可以用路段出行费用来表示

$$c_k^i = \sum_{a \in A} t_a(x_a) \delta_{a,k}^{ri} \quad (3)$$

其中: $\delta_{a,k}^{ri}$ 表示路段与路径之间的关联关系,如果路段 a 在 ri 之间的路径 k 上,其取值为 1, 否则其取值为 0.

出行者对出行费用的理解误差可以用随机变量来表示.本文假定出行费用中所包含的随机误差都满足期望值为 0 的正态分布,装备 ATIS 和不装备 ATIS 的出行者具有不同的方差.

首先,对于装备 ATIS 的出行者来说,路径上的出行费用和停车的延误费用可以分别表示为

$$\begin{aligned} \bar{c}_k^i &= c_k^i + \bar{\epsilon}_k^i, \quad \bar{\epsilon}_k^i \\ &= \sum_{a \in A} \bar{\epsilon}_a \delta_{a,k}^{ri}, \quad \bar{\epsilon}_a \sim N(0, \alpha t_a^0) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{t}_i = t_i + \bar{\zeta}_i, \quad \bar{\zeta}_i \sim N(0, \beta t_i^0) \quad (5)$$

其中: $\bar{\epsilon}_k^i, \bar{\epsilon}_a$ 分别表示从起点 r 到停车场 i 之间的路径 k 上出行费用的随机变量以及路段 a 上的出行费用的随机变量; $\bar{\zeta}_i$ 表示在停车场 i 的延误费用的随机变量; t_a^0 为路段 a 上的零流费用; t_i^0 表示停车场 i 的零流费用; α, β 为校正参数.

根据式(2),装备 ATIS 的出行者从起点 r 到终点 s 且选择停车场 i 总的出行时间可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{C}_{ki}^s &= \bar{c}_k^i + \bar{t}_i + w_{is} \\ &= (c_k^i + t_i + w_{is}) + (\bar{\epsilon}_k^i + \bar{\zeta}_i) \end{aligned} \quad (6)$$

其选择概率可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{p}_{ki}^s &= \Pr(\bar{C}_{ki}^s \leq \bar{C}_{hl}^s, \forall h \in K_{ri}, \\ &\quad \forall l \in I_s, h \neq k \text{ 或 } l \neq i) \end{aligned} \quad (7)$$

而对于未装备 ATIS 的出行者来说,类似于式(4)一式(7),可以写出下面的式子

$$\begin{aligned} \hat{c}_k^i &= c_k^i + \hat{\epsilon}_k^i, \\ \hat{\epsilon}_k^i &= \sum_{a \in A} \hat{\epsilon}_a \delta_{a,k}^{ri}, \\ \hat{\epsilon}_a &\sim N(0, \hat{\alpha} t_a^0) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\hat{t}_i = t_i + \hat{\zeta}_i, \quad \hat{\zeta}_i \sim N(0, \hat{\beta} t_i^0) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{C}_{ki}^s &= \hat{c}_k^i + \hat{t}_i + w_{is} \\ &= (c_k^i + t_i + w_{is}) + (\hat{\epsilon}_k^i + \hat{\zeta}_i) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \hat{p}_{ki}^s &= \Pr(\hat{C}_{ki}^s \leq \hat{C}_{hl}^s, \forall h \in K_{ri}, \\ &\quad \forall l \in I_s, h \neq k \text{ 或 } l \neq i) \end{aligned} \quad (11)$$

根据上面的式子, 可以写出基于随机用户均衡原则的路径及停车流量

$$\bar{f}_{ki}^{rs} = \bar{p}_{ki}^{rs} \bar{q}_{rs}, \hat{f}_{ki}^{rs} = \hat{p}_{ki}^{rs} \hat{q}_{rs} \quad (12)$$

其中: $\bar{f}_{ki}^{rs}, \hat{f}_{ki}^{rs}$ 分别表示装备及未装备 ATIS 的出行者选择路径 $k \in K_{ri}$ 以及停车场 $i \in I_s$ 的数量; $\bar{q}_{rs}, \hat{q}_{rs}$ 分别表示在起点 $r \in O$ 和终点 $s \in D$ 之间的装备及未装备 ATIS 的出行者需求量。

假定 $O-D$ 对 rs 之间的总的出行需求量是固定的, 本文用 q_{rs} 表示, 那么

$$\bar{q}_{rs} + \hat{q}_{rs} = q_{rs} \quad (13)$$

2 ATIS 市场占有率问题

在分析 ATIS 对交通网络性能的影响中, 有一个重要的参数是 ATIS 的市场占有率, 用 b_{rs} 来表示, 有

$$b_{rs} q_{rs} = \bar{q}_{rs}, (1 - b_{rs}) q_{rs} = \hat{q}_{rs} \quad (14)$$

通常情况下, 购买并装备 ATIS 的出行者是为了得到比较准确的交通信息(包括道路信息和停车信息), 从而降低出行者的出行费用, 出行者是否购买 ATIS 主要取决于该系统能否为出行者带来“效益”, 这里所说的“效益”实际上是指出行者在出行过程中节省的出行费用. ATIS 的市场占有率是一个变量. 它是由出行者节省的出行费用和购买该系统的费用所决定的。

假定用 \bar{C}_{rs} 和 \hat{C}_{rs} 分别表示装备和未装备 ATIS 的出行者从起点 r 到终点 s 之间的出行费用的期望值, 那么, 使用 ATIS 能够为出行者节省的出行费用可以表示为

$$S_{rs} = \hat{C}_{rs} - \bar{C}_{rs} \quad (15)$$

通常, $S_{rs} (r \in O, s \in D)$ 是正值, 这是因为在一般情况下, 使用 ATIS 的出行者由于能够获得更准确的交通信息, 进而可以节省其出行费用, 因此 $\hat{C}_{rs} > \bar{C}_{rs}$ 。

本文, 采用下面的指数函数形式来表示 ATIS 的市场占有率

$$b_{rs} = \frac{1}{1 + \exp(\lambda - \theta S_{rs})} \quad (16)$$

其中 λ 表示出行者购买 ATIS 的费用, θ 是校正参数, 表示出行者对购买费用和节省出行费用两个因素之间的敏感程度. 如果 θ 取值较大, 表示出行

者对节省出行费用比较敏感; 相反, 如果 θ 取值较小, 则表示出行者对购买费用比较敏感。

3 基于概率的随机用户均衡配流模型

假定总的 $O-D$ 需求不变, 构造 ATIS 条件下的道路和停车选择问题的随机用户均衡模型 (P). 此模型实际上是一个无约束的数学优化问题, 即

$$\begin{aligned} \min Z(\bar{x}, \hat{x}, \bar{y}, \hat{y}, \bar{q}, \hat{q}) = & \\ & \left\{ \sum_{a \in A} \bar{x}_a t_a(\bar{x}_a) + \sum_{i \in I} \bar{y}_i t_i(\bar{y}_i) - \right. \\ & \sum_{a \in A} \int_0^{\bar{x}_a} \bar{t}_a(w) dw - \sum_{i \in I} \int_0^{\bar{y}_i} \bar{t}_i(w) dw - \\ & \left. \sum_{r \in O} \sum_{s \in D} \bar{q}_{rs} E \left[\min_{i \in I_s, k \in K_n} \{ \bar{C}_{ik}^{rs} \} \mid \bar{c}^{ri}(\bar{x}), \bar{t}(\bar{y}) \right] \right\} + \\ & \left\{ \sum_{a \in A} \hat{x}_a t_a(\hat{x}_a) + \sum_{i \in I} \hat{y}_i t_i(\hat{y}_i) - \right. \\ & \sum_{a \in A} \int_0^{\hat{x}_a} \hat{t}_a(w) dw - \sum_{i \in I} \int_0^{\hat{y}_i} \hat{t}_i(w) dw - \\ & \left. \sum_{r \in O} \sum_{s \in D} \hat{q}_{rs} E \left[\min_{i \in I_s, k \in K_n} \{ \hat{C}_{ik}^{rs} \} \mid \hat{c}^{ri}(\hat{x}), \hat{t}(\hat{y}) \right] \right\} + \\ & \sum_{r \in O} \sum_{s \in D} \int_0^{\bar{q}_{rs}} \frac{1}{\theta} (\ln w + \lambda) dw + \\ & \sum_{r \in O} \sum_{s \in D} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \frac{\ln w}{\theta} (\ln w) dw \quad (17) \end{aligned}$$

其中: $E \left[\min_{i \in I_s, k \in K_n} \{ \bar{C}_{ik}^{rs} \} \mid \bar{c}^{ri}(\bar{x}), \bar{d}(\bar{y}) \right], E \left[\min_{i \in I_s, k \in K_n} \{ \hat{C}_{ik}^{rs} \} \mid \hat{c}^{ri}(\hat{x}), \hat{d}(\hat{y}) \right]$ 分别表示装备 ATIS 和未装备 ATIS 的出行者从起点 $r \in O$ 到终点 $s \in D$ 之间的最小出行费用的期望值. 有^[13]

$$\begin{aligned} \frac{\partial E \left[\min_{i \in I_s, k \in K_n} \{ \bar{C}_{ik}^{rs} \} \mid \bar{c}^{ri}(\bar{x}), \bar{d}(\bar{y}) \right]}{\partial \bar{C}_{ki}^{rs}} &= \bar{p}_{ki}^{rs} \\ \frac{\partial E \left[\min_{i \in I_s, k \in K_n} \{ \hat{C}_{ik}^{rs} \} \mid \hat{c}^{ri}(\hat{x}), \hat{d}(\hat{y}) \right]}{\partial \hat{C}_{ki}^{rs}} &= \hat{p}_{ki}^{rs} \end{aligned} \quad (18)$$

下面证明模型 (P) 等价于本文所提出的基于概率的随机用户均衡问题. 首先, 可以写出无约束优化问题 (P) 的一阶必要条件如下

$$\frac{\partial Z}{\partial x_a} = \frac{\partial Z}{\partial \hat{x}_a} = \frac{\partial Z}{\partial y_i} = \frac{\partial Z}{\partial \hat{y}_i} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial q_{rs}} = \frac{\partial Z}{\partial \bar{q}_{rs}} = 0 \quad (20)$$

根据式(19),可以得出^[13]

$$\frac{\partial Z}{\partial x_a} = \left(- \sum_n \sum_k \bar{q}_{rs} \bar{p}_{ik}^{rs} \delta_{a,k}^{ri} + \bar{x}_a \right) \frac{d\bar{t}_a(\bar{x}_a)}{d\bar{x}_a} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial y_i} = \left(- \sum_n \sum_k \bar{q}_{rs} \bar{p}_{ik}^{rs} \delta_{a,k}^{ri} + \bar{y}_i \right) \frac{d\bar{t}_i(\bar{y}_i)}{d\bar{y}_i} = 0 \quad (22)$$

因为路段费用函数和停车费用函数是单调递增函数,所以 $\frac{d\bar{t}_a(\bar{x}_a)}{d\bar{x}_a} > 0, a \in A, \frac{d\bar{t}_i(\bar{y}_i)}{d\bar{y}_i} > 0, i \in I$.

由式(21)可以得到 $\bar{x}_a = \sum_n \sum_k \bar{q}_{rs} \bar{p}_{ik}^{rs} \delta_{a,k}^{ri}$, 也就是 $\bar{f}_{ki}^{rs} = \bar{q}_{rs} \bar{p}_{ki}^{rs}$, 可以把 \bar{x}_a 和 \bar{y}_i 均看作交通网络中的路段流量, 所以式(22)也可以得出同样结论. 这就证明了对于装备 ATIS 的出行者来说, 模型(P) 的解满足基于概率的随机用户均衡条件.

同理, 可以得出 $\hat{f}_{ki}^{rs} = \hat{q}_{rs} \hat{p}_{ki}^{rs}$, 即证明了对于未装备 ATIS 的出行者来说, 模型(P) 的解满足的基于概率的随机用户均衡条件.

根据式(20), 可以得出 $\frac{\partial Z}{\partial q_{rs}} = \frac{1}{\theta} (\ln \bar{q}_{rs} + \lambda) - \bar{C}_{rs} = 0$, 此式也可以写为 $\ln \bar{q}_{rs} = \theta \bar{C}_{rs} - \lambda$, 即 $\bar{q}_{rs} = \exp(\theta \bar{C}_{rs} - \lambda)$, 同样, 也可以得到 $\hat{q}_{rs} = \exp(\theta \hat{C}_{rs})$. 显然, 由上面的式子可以得出下面的结果

$$\frac{\bar{q}_{rs}}{q_{rs}} = \frac{\bar{q}_{rs}}{q_{rs} + \hat{q}_{rs}} = \frac{\exp(\theta \bar{C}_{rs} - \lambda)}{\exp(\theta \bar{C}_{rs} - \lambda) + \exp(\theta \hat{C}_{rs})} = \frac{1}{1 + \exp(\lambda - \theta S_{rs})} = b_{rs} \quad (23)$$

这样, 就证明了模型(P) 的解满足式(16) 的需求分离关系.

4 求解算法

目前, 有很多学者提出了不同的求解随机用户均衡(SUE) 问题的算法, 文献[14] 提出了一种 MSA 算法(Method of Success Average) 来求解满足 Logit 随机加载模式的 SUE 问题. 本文即采用 MSA 算法来求解道路和停车选择的 SUE 问题, 具体算法步骤如下.

步骤 1 初始化. 设定路段出行费用的初始值和停车费用的初始值 $t_a^0, a \in A$ 和 $t_i^0, i \in I$, 以

及 ATIS 市场占有率的初始值 $b_{rs}^{(0)}, r \in O, s \in D$, 执行一次随机加载将交通需求 $b_{rs}^{(0)} q_{rs}$ 和 $(1 - b_{rs}^{(0)}) q_{rs}$ 加载到交通网络上, 得到路段流量 $x_a^{(0)}, a \in A$ 和停车流量 $y_i^{(0)}, i \in I$. 并设置迭代次数 $n := 0$.

步骤 2 计算费用. 在 $x_a^{(n)}$ 和 $y_i^{(n)}$ 的基础上, 计算路段出行费用和停车费用 $t_a^{(n)}$ 和 $t_i^{(n)}$.

步骤 3 寻找迭代方向. 根据路段费用和停车费用 $t_a^{(n)}$ 和 $t_i^{(n)}$, 执行一次随机加载将 $b_{rs}^{(n)} q_{rs}$ 和 $(1 - b_{rs}^{(n)}) q_{rs}$ 加载到交通网络上, 得到路段流量和停车流量的辅助值 $u_a^{(n)}, a \in A$ 和 $v_i^{(n)}, i \in I$.

步骤 4 更新流量. 计算

$$x_a^{(n+1)} = x_a^{(n)} + \left(\frac{1}{n+1} \right) (u_a^{(n)} - x_a^{(n)}), a \in A$$

$$y_i^{(n+1)} = y_i^{(n)} + \left(\frac{1}{n+1} \right) (v_i^{(n)} - y_i^{(n)}), i \in I$$

并且根据式(16) 得到新的 ATIS 市场占有率.

步骤 5 收敛性检查. 如果满足收敛性要求, 算法停止; 否则令 $n := n + 1$, 转到第 2 步.

值得注意的是, 在上述算法中, 每次迭代都需要执行一次基于概率的随机加载过程, 对于概率加载模型, 比较可行实用的方法就是 Monte-Carlo 模拟方法, 即通过符合正态分布的随机数发生器产生路段费用和停车费用, 再执行网络加载. 关于此种模拟方法的具体操作, 可参考文献[13], 在此不再赘述.

5 数值分析

本文采用文献[2] 的数值例子来说明模型及算法的有效性. 网络结构如图 1 所示.

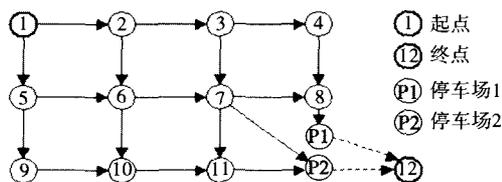


图 1 交通网结构

Fig.1 Structure of example network

路段费用函数采用如下的 BPR 形式

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left\{ 1 + 0.15 \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^4 \right\}, a \in A$$

停车费用函数采用如下形式^[15]

$$t_i(y_i) = t_i^0 + 0.31 \left(\frac{y_i}{H_i} \right)^{4.03} + p_i, i \in I$$

其中: t_i^0, H_i, p_i 分别表示停车场 $i \in I$ 的零流等待时间、能力和收费. 与停车相关的数据以及步行路段上的时间由表 1 给出.

路段零流费用 t_a^0 、路段通行能力 C_a 的取值由表 2 给出, ATIS 市场占有率的表达式(16)中的参数取值分别为 $\lambda = 1.25$ 及 $\theta = 30$.

表 1 停车场数据

Table 1 Data of car parks

停车场	t_i^0/h	p_i/h	H_i/PCU	w_{is}/h
1	0.06	0.2	700	0.05
2	0.08	0.1	1 400	0.065

表 2 路段数据

Table 2 Data of links

路段	t_a^0/h	$C_a/PCU \cdot h^{-1}$	路段	t_a^0/h	$C_a/PCU \cdot h^{-1}$
(1,2)	0.111	1 000	(7,8)	0.072	1 000
(2,3)	0.128	500	(5,9)	0.133	800
(3,4)	0.094	500	(6,10)	0.111	500
(1,5)	0.100	1 500	(7,11)	0.144	500
(2,6)	0.106	500	(9,10)	0.039	800
(3,7)	0.089	500	(10,11)	0.100	800
(4,8)	0.122	500	(8, P2)	0.067	850
(5,6)	0.078	1 000	(11, P1)	0.139	700
(6,7)	0.094	1 000	(7, P1)	0.189	850

一般来说, 出行者在实际的出行过程中, 选择路段的不确定因素要比选择停车位的不确定因素多, 因此, 表示出行者选择路段的随机因素的参数值 $\hat{\alpha}$ 和 $\bar{\alpha}$ 会大于表示出行者选择停车场的随机因素的参数值 $\hat{\beta}$ 和 $\bar{\beta}$. 对于未装备 ATIS 的出行者来说, 表示选择路段和停车场的随机因素参数分别取值为 $\hat{\alpha} = 1.0, \hat{\beta} = 0.5$. 对于装备 ATIS 的出行者来说, 表示道路选择和停车选择的随机因素参数取值分为两种情况: 1) $\bar{\alpha} = 1$ 和 $\bar{\beta} = 0$, 表示 ATIS 只提供给出行者准确的停车信息; 2) $\bar{\alpha} = 0$ 和 $\bar{\beta} = 0$ 表示 ATIS 能够为出行者提供准确的路段信息和停车信息, 也就是说出行者以标准 UE 方式进行道路和停车的选择.

图 2 给出了在不同的交通需求和 ATIS 提供不同的交通信息的情况下, ATIS 的市场占有率随着迭代次数的变化情况. 可以看出, 本文所采用的算法, 其收敛速度是比较快的, 尤其在交通需求比较低的情况下. 还可以看出, 如果 ATIS 提供准确的道路和停车信息, 那么 ATIS 的市场占有率是比

较高的, 这一点是符合实际情况的. 这是因为 ATIS 为出行者带来的效益越高, 就会有越来越多的出行者使用 ATIS. 另外, 通过此算例可以说明, 本文所采用的算法在理论上虽然无法证明其收敛性, 不过在实际应用中其收敛效果还是不错的.

图 3 给出了 ATIS 提供不同的交通信息的情况下, 不同的交通需求对 ATIS 市场占有率的影响. 从这个结果中可以看出, 如果 ATIS 只提供停车信息, ATIS 的市场占有率是随着交通需求的增加而增加的, 一直达到其均衡点. 这是因为, 相对于路径选择来说, 出行者选择停车场的不确定因素比较少, 所以在交通需求比较低的时候, 交通网络的拥挤程度并不大, 那么购买并使用 ATIS 的用户比较少, 但是随着交通需求的增加, 整个交通网络的拥挤程度也会随之增加, 这时候, 出行者选择停车场的不确定因素也会随之变多, 由于 ATIS 能够为出行者提供准确的停车信息, 使得购买 ATIS 的出行者大大节省其出行费用, 所以购买 ATIS 的出行者就会逐渐增多, 从而使 ATIS 的市场占有率增加. 如果 ATIS 能够提供全面的道路信息和停车信息, 从图 3 的结果可以看出, ATIS 的占有率是随着交通需求的增加而减少的, 最后也达到一个均衡点. 这是因为, ATIS 能够为出行者提供全面的道路和停车信息, 出行者节省的交通费用大大超过购买 ATIS 的费用, 所以即使在交通需求不是很大的时候, 使用 ATIS 的出行者的人数就很多, 随着交通需求的增加, 交通网络的拥挤程度越来越大, 在使用 ATIS 的出行者超过一定的比例后, 使用该系统的效果反而会降低, 也就是说使用 ATIS 已经不能够再为出行者带来效益, 这样就会有越来越多的出行者放弃使用 ATIS, 最终导致 ATIS 的市场占有率下降.

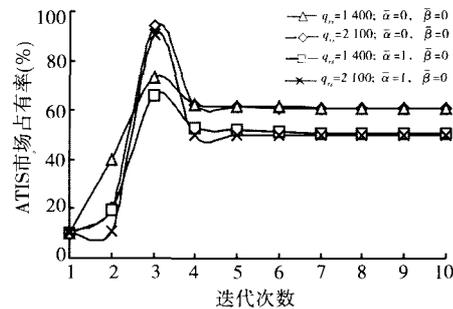


图 2 算法收敛性

Fig. 2 The convergence of algorithm

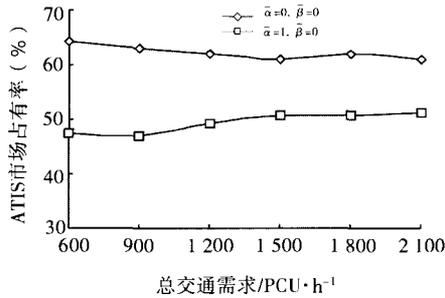


图 3 交通需求对 ATIS 市场占有率的影响

Fig.3 The impact of demand on ATIS market penetration

表 3 给出了装备 ATIS 的出行者和未装备 ATIS 的出行者的路径上出行费用的均衡值和在寻找停车延误费用的均衡值.同上面的分析一样,对于装备 ATIS 系统的出行者分为两种情况,即 1)ATIS 只提供准确的停车信息和 2)ATIS 提供准确的道路

信息和停车信息.在第 1 种情况下,ATIS 的市场占有率的均衡值为 48%.装备 ATIS 的出行者在道路上的出行费用比交通网络中没有 ATIS 时的费用还会稍微多一点(0.564 > 0.517).不过,ATIS 在选择停车场方面为出行者节省的费用是比较多的,在这种情况下可以为出行者节省大约 4.3% 的出行费用.在第 2 种情况下,ATIS 可以为出行者提供准确的道路信息和停车信息,此时 ATIS 的市场占有率的均衡值为 61%.这时候,装备 ATIS 的出行者以标准 UE 模式进行道路和停车的选择,与没有 ATIS 相比,总的出行费用可以节省大约 8.3%.另外,从表 3 的结果还可以发现,无论是在第 1 种情况还是第 2 种情况下,未装备 ATIS 的出行者同时都会获得效益.

表 3 数值例子的结果分析

Table 3 The results of numerical example

$q_{rs} = 2\ 100/\text{PCU}\cdot\text{h}^{-1}$		c_k^0/h	t_i/h	w_{is}/h	C_k^0/h
没有 ATIS 系统		0.517	0.353	0.05	0.920
ATIS 只提供停车信息	装备系统的出行者	0.564	0.266	0.05	0.880
	未装备系统的出行者	0.968	0.283	0.05	1.301
ATIS 提供道路信息和停车信息	装备系统的出行者	0.523	0.271	0.05	0.844
	未装备系统的出行者	0.856	0.269	0.05	1.175

需要指出的是,在这个分析中,假定总的交通需求是固定不变的($q_{rs} = 2\ 100\ \text{PCU}/\text{h}$),对于交通需求是变动的情况下 ATIS 对于出行者的影响,可参考相关的一些文献^[3].

另外,在数值例子中,假定 ATIS 提供给出行者的道路信息或停车信息是完全准确的,如果考虑 ATIS 所提供的交通信息的不确定性,那么可以通过调整参数 $\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 的值来进行分析.

参 考 文 献:

[1]Thompson R G, Richardson A J. A parking search model[J]. Transportation Research-A, 1998, 32(3): 159—170.
 [2]Yang H. Multiple equilibrium behaviors and advanced traveler information systems with endogenous market penetration[J]. Transportation Research-B, 1998, 32(3): 205—218.
 [3]Li Zhi-chun, et al. Determination of Equilibrium Market Penetration in General Networks with Overall Demand Elasticity Under Advanced Travel Information Systems[C]. Proc. of the 8th HKSTS Conference, Dec. 2003, Hong Kong, 462—471.
 [4]杨晓光. 中国交通信息系统基本框架体系研究[J]. 公路交通科技, 2000, 17(5): 50—55.
 Yang Xiao-guang. Studies on architecture of transportation information systems in China[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17(5): 50—55.(in Chinese)
 [5]关宏志, 刘兰辉, 廖明军. 停车诱导系统的规划设计方法初探[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 136—139.
 Guan Hong-zhi, Liu Lan-hui, Liao Ming-jun. Approach for planning of parking guidance and information system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 136—139.(in Chinese)
 [6]石小法. ATIS 环境下动态选择模型的研究[J]. 系统工程学报, 2002, 17(3): 271—276.

- Shi Xiao-fa. Study on dynamic choice model for ATIS[J]. Journal of Systems Engineering, 2002, 17(3): 271—276. (in Chinese)
- [7]熊 轶, 黄海军, 李志纯. 交通信息系统作用下的随机用户均衡模型与演进[J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3(3): 44—48.
- Xiong Yi, Huang Hai-jun, Li Zhi-chun. A stochastic user equilibrium model under ATIS and Its evolutionary implementation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2003, 3(3): 44—48. (in Chinese)
- [8]Van Der Goot. A model to describe the choice of parking places[J]. Transportation Research-A, 1982, 16(2): 109—115.
- [9]Lambe T A. Driver choice of parking in the city [J]. Socio-Economics Planning Sciences, 1996, 30(3): 207—219.
- [10]Asakura Y. Comparison of Spatia Location Patterns of PGI Message Board: A Microscopic Network Simulation Model[C]. Proceedings of the Second Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, Hong Kong, 1997. 9—14.
- [11]Si Bing-feng, Lam W H K, Liu Zhi-chun. Modeling Stochastic Parking and Route Choice Behaviors Under Advanced Travel Information System with Equilibrium Market Penetration[C]. Proceedings of the 7th Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, Hong Kong, 2002.
- [12]Hall R W. Route choice and advanced traveler information systems on a capacitated and dynamic network[J]. Transportation Research-C, 1996, 4(5): 289—306.
- [13]Sheffi Y. Urban Transportation Network: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods[M]. New Jersey: Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, 1985.
- [14]Powell W B, Sheffi Y. The convergence of equilibrium algorithms with predetermined step sizes[J]. Transportation Science, 1982, 16: 45—55.
- [15]Lam W H K, Tam M L, Yang H, *et al.* Balance of Demand and Supply of Parking Spaces[C]. Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel, 20-23 July 1999, 707—731.

Stochastic user equilibrium model for parking and route choice under advanced travel information system

SI Bing-feng¹, W. H. K LAM²

1. Institute of System Science, School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Department of Civil & Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Abstract: In this paper, two classes of drivers are considered: the drivers with ATIS and the drivers without ATIS. Both types of drivers choose the car parks and routes simultaneously in a stochastic manner but with different perception variances. A multi-class probit-based SUE model is formulated to describe the combined parking and route choice problem at any given market penetration that is defined as the percentage of the drivers equipped with ATIS. Also an iterative solution algorithm for solving this combined parking and route choices problem is presented with a numerical example.

Key words: ATIS; stochastic user equilibrium; optimal model; algorithm