

## 多源信息约束下的路径选择模型与算法

郭洪洋<sup>1\*</sup>, 张 玺<sup>2</sup>, 刘 澜<sup>1</sup>, 刘海旭<sup>1</sup>, 闫 锴<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学 经济管理学院, 成都 610031;

3. 沈阳化工大学 科亚学院, 沈阳 110142)

(\* 通信作者电子邮箱 hongyang.guo@163.com)

**摘 要:**针对交通诱导管理措施的制定常缺乏理论支持的问题,提出信息约束机理作用下的时变路径选择行为研究方法。从人的知觉角度出发基于模糊聚类算法深入解析了多源交通信息(MSTI)的约束规律,借助 VISSIM 软件模拟路网环境并构建交通状态模式识别模型模拟信息约束下出行者的心理活动。采用意向(SP)调查法获取驾驶员在路网中的路径选择决策数据,并利用 Biogeme 软件对行为数据建模。结果表明,当偏好路径拥挤不严重时,信息很难对行为产生约束,出行者更倾向于坚持偏好路径;但随着偏好路径拥挤加剧,在信息影响下路径变更行为渐趋频繁,相应的信息对行为的约束也逐渐增强。研究结论为信息环境下出行者的不完全理性行为研究提供了思路及借鉴,并可为交通管理部门提供决策支持。

**关键词:**多源交通信息;信息约束机理;动态路径选择;偏好;模糊聚类;知觉

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A

### Route choice model and algorithm under restriction of multi-source traffic information

GUO Hongyang<sup>1</sup>, ZHANG Xi<sup>2</sup>, LIU Lan<sup>1</sup>, LIU Haixu<sup>1</sup>, YAN Kai<sup>3</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

3. Keya in Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang Liaoning 110142, China)

**Abstract:** To the shortage of theoretical support in the policy-making process of traffic guidance management, the research method of choice behavior with confinement mechanism of traffic information was proposed. From the perspective of human perception, the deep analysis of Multi-Source Traffic Information (MSTI) constraint rule was presented based on fuzzy clustering algorithm, then the road network environment was simulated by VISSIM and the traffic state pattern recognition model was established to simulate the mental activity of traveler under restriction of information. Then by means of Biogeme software, the choice model was constructed based on the behavior survey data, which was obtained in the road network example by using Stated Preference (SP) investigate method. Results show that the sanction of traffic information on travel behavior is very limited and the travelers prefer the preference path when traffic of this preference path is not very heavy, while this sanction enhances gradually and the path change behavior, which is influenced by the information, becomes more frequent when the preference path is more congested. The conclusions provided a new idea and reference for incomplete rational behavior research under the information environment, and also provided decision support for traffic management department.

**Key words:** Multi-Source Traffic Information (MSTI); restriction mechanism of traffic information; dynamic route choice; preference; fuzzy clustering; human perception

## 0 引言

信息环境下的城市路网系统中,由于路网性能的不确定性,出行者在做出行路径选择决策时表现出随机性;同时实时交通信息又使出行者能够动态选择当前最有利的路径,因此在时间维度上路径选择决策又体现出时变特性。此外,在多源交通信息(Multi-Source Traffic Information, MSTI)的影响下,出行者的出行理念和行为模式也会发生改变,所以深入分析 MSTI 的约束机理及其约束下的路径选择行为的时变性及随机性是制定可靠交通诱导管理措施的根本前提。

为研究信息发布对出行决策行为的影响,国内外从不同角度展开研究。Axhausen 等<sup>[1]</sup>从心理学角度分析了出行者对交通信息的感知、判断和处理过程;Caplice 等<sup>[2]</sup>首先从动态角度研究了交通信息对小汽车出行者路径选择影响;此后动态研究陆续开展,Khattak 等<sup>[3]</sup>研究了交通信息对驾驶员出行行为的影响,提出出行决策影响因素为拥挤程度、行程时间等;Srinivasan 等<sup>[4]</sup>设计了交互式多用户决策模拟器,并例证交通信息会增强出行者对行程时间波动的敏感程度,使路径变更行为更频繁;Srinivasan 等<sup>[5]</sup>研究出行者对交通信息的顺从程度,证明路网当前状态是出行决策重要影响因素并建立

**收稿日期:** 2014-01-16; **修回日期:** 2014-03-17。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50908196); 中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU09ZT18); 四川省学术和技术带头人培养资金项目(川人办发[2008]24号)。

**作者简介:** 郭洪洋(1982-),男,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向:信息约束下的路网可靠性; 张玺(1982-),男,重庆人,博士,主要研究方向:交通运输规划与管理; 刘澜(1965-),男,四川雅安人,教授,博士,主要研究方向:交通运输规划与管理; 刘海旭(1974-),男,四川峨眉山人,副教授,博士,主要研究方向:交通运输规划与管理; 闫锴(1982-),男,辽宁沈阳人,讲师,硕士,主要研究方向:智能信息系统。

Multinomial Probit (MNP) 路径选择模型; Peeta 等<sup>[6]</sup>考虑了出行者有限理性因素, 基于 Logit 模型验证了可变信息板对驾驶员路径选择行为的影响; Mahmassani 假设某项指标达到某一阈值才触发行者调整行为, 并建立路径选择 MNP 模型, 此后针对 MNP 求解困难问题, 又建立了计算简便的 Mixed Logit 模型<sup>[7]</sup>; Srinivasan 等<sup>[8]</sup>建立了信息影响下驾驶员路径选择多项 Logit (Multinomial Logit, MNL) 模型, 并使用模糊逻辑方法和离散选择模型进行混合仿真。然而, 上述研究出于简化问题复杂性目的, 均将交通信息视为单源 (仅描述路网的某单一特征) 信息, 未考虑 MSTI 同时发布时出行者如何响应; 此外上述研究均未从心理层面深入挖掘信息约束机理及不完全理性影响下的出行决策行为规律, 研究结论的推广受到限制。因此本文从行为、心理学角度挖掘 MSTI 的约束机理, 采用近似算法模拟出行者面对 MSTI 约束下的心理活动, 并在此基础上深入剖析 MSTI 环境下的出行决策过程, 提出考虑出行者偏好、有封闭推导式的选择概率模型, 随后在算例中验证该模型的有效性。研究结论可为未来 ITS 的发展提供客观、准确的新视角。

## 1 相关定义及假设

参考时段  $l$ : 路网的状态改变量较小、根据研究目的不需要区分或受技术限制无法区分的无重合的最小时间区段。本文  $l$  取实时信息刷新时间间隔。

分析时段  $Y_l$ : 若干  $l$  按照发生时序排列组成的离散时域,  $Y_l = \{1, 2, \dots, l, \dots, L\}$ 。令  $L$  足够大以保证在  $Y_l$  内可观测路网状态变化, 本文取 7:00 ~ 9:00 早高峰时段。

MSTI: 通过不同的发布方式 (交通广播、可变信息板、车载导航系统等) 发布、从不同角度 (交通事故、排队长度、车头时距、实时车速、路面占有率、交通流量等数据) 描述路网当前运行状态特征的交通信息。设  $Y_l$  时段内 MSTI 由  $B'$  类交通信息构成且  $B'$  类信息刷新时间间隔均为 5 min, 则可确定  $Y_l$  时段内的多源信息组数目为常数  $J$ , 设集合  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_J\}$  为  $Y_l$  时段多源信息组样本空间, 样本  $x_j (j \in J)$  为  $B'$  维向量,  $x_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jB'}\}$ 。

信息约束: 路径选择决策要以行程时间预算为依据, 而该预算要基于对路径拥挤状态的辨识, 在辨识领域, 客体 (路网运行状态) 的实时特征信息通过限制出行者的选择决策, 对出行行为产生约束功能。约束的内涵为: 为规避拥挤带来心理压力、行程延误及经济损失<sup>[9]</sup>, 出行者会依照实时信息迅速调整当前路径规避拥挤路段, 该变更行为由实时交通信息触发并受其制约, 可视实时信息对出行行为产生约束。

## 2 信息约束机理

### 2.1 信息约束下的出行决策分析

信息环境中基于计划行为理论的出行决策过程如图 1。由图 1 可知, 出行者  $i$  基于先验信息加工所获交通信息并将加工后信息用于方案的效用评价得到行为态度, 并在行为态度、知觉行为控制、主观规范、个人规范的叠加作用下实施出行。在信息加工过程中, 人脑与交通信息产生互动, 引起知觉、注意、表象、记忆及识别等心理活动, 属认知心理学范畴, 因此引入认知理论分析信息产生影响过程, 即主体对客体 (路网运行状态) 特征信息的获取、处理、再生的完整认知过程<sup>[10]</sup>。

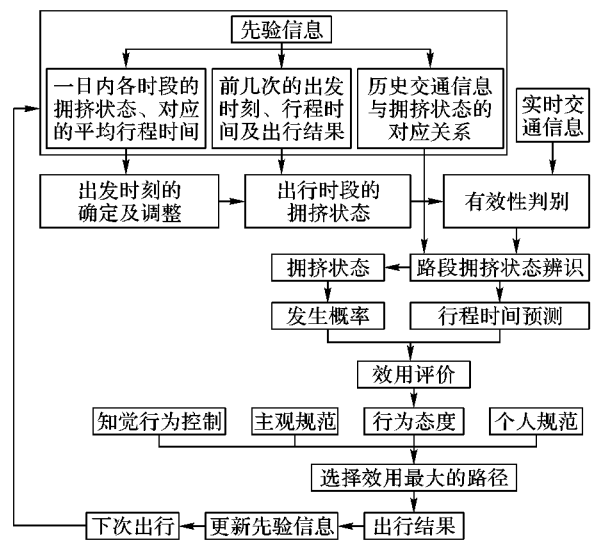


图1 信息约束下的出行决策过程简图

### 2.2 MSTI 环境中出行者的交通状态模式识别

客体各类特征信息通过多种媒介传递给主体, 引发多个认知过程构成“知觉”<sup>[11]</sup>, 而知觉研究核心是模式识别, 因此信息约束机理研究等同于研究 MSTI 约束下的模式识别。

在模板匹配模型基础上, 原型匹配 (Prototype-Based matching, PBN) 模型<sup>[12]</sup>被提出, PBN 理论认为主体大脑内的原型 (Proto Type, PT) 是一种信号刺激的概括表征: 当主体进行模式识别时, 客体特征信息不必与原型准确匹配, 而通过近似匹配便会被主体识别。该理论可以用于解释现实中出行者较强的环境适应能力及灵活的突发事件处理能力。PBN 流程如图 2 所示。



图2 PBN 流程

由图 2 可知模式识别的关键是找出交通状态 PT 及模式识别原则。 $i$  依出行经验对拥挤状态分级, 各级对应固定交通状态 PT。出行中  $i$  将实时 MSTI 依照某准则与交通状态 PT 进行匹配, 完成模式识别。

### 2.3 交通状态 PT 的确定

$i$  将交通状态划分为  $S$  个等级, 得交通状态集  $(a_1, a_2, \dots, a_S)$  与对应的交通状态 PT 集  $(P_1^{PT}, P_2^{PT}, \dots, P_S^{PT})$ ; 模式识别时,  $i$  将所获  $x_j$  与  $P_s^{PT} (s \in S)$  近似匹配, 并将匹配结果用于模式识别, 完成交通状态辨识, 该辨识过程属非监督式模式识别<sup>[13]</sup>, 因此引入模糊集理论模拟该过程: 用历史多源交通信息的模糊聚类中心矩阵  $G = (g_1, g_2, \dots, g_S)$  近似代替交通状态 PT, 建立 PBN 模型, 交通状态辨识流程如图 3 所示。

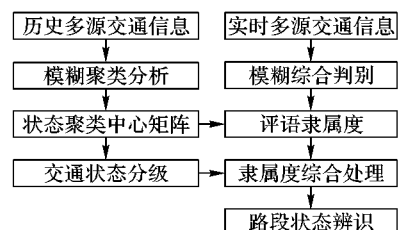


图3 交通状态辨识流程

图3 流程用模糊聚类分析语言表示为:  $Y_l$  时段内全部样

本构成分明论域  $X = (x_1, x_2, \dots, x_j)$ ,  $X$  被  $S$  个交通状态等级分为  $S$  个模糊子集  $(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_S)$ ,  $x_j$  对  $\tilde{A}_s (s \in S)$  存在唯一隶属度  $\mu_s(x_j) \in [0, 1]$ ; 为确定  $X_{i,m}$ , 先要度量  $\tilde{A}_s$  内及  $\tilde{A}_s (s \in S)$  间相似程度, 因人类大脑短时记忆容量为 4 个信息组块 (chunk)<sup>[14]</sup>, 即多数出行者决策时同时可处理的 MSTI 种类数不大于 4, 即  $2 \leq B' \leq 4$ , 因此选取适于低维聚类的欧氏距离度量相似度, 并对  $\tilde{A}_s$  聚类划分, 即用模糊聚类中心矩阵表示匹配原型矩阵  $G = (g_1, g_2, \dots, g_s)$ , 模糊聚类运算过程如文献[15]所示。

## 2.4 出行者出行中的模式识别

### 2.4.1 确定匹配函数

不同  $i$  采用不同方法将  $x_j$  与  $P_s^{PT}$  匹配, 因此存在形式各异的匹配函数, 但若反映同时段相似交通状态, 处理结果常殊途同归。本文采用简便、直观的梯形分布与三角形分布匹配函数模拟近似匹配, 得  $x_j$  的模糊匹配矩阵  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1S} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2S} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{B1} & \mu_{B2} & \dots & \mu_{BS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\mu_{bs} (0 \leq \mu_{bs} \leq 1, \text{且} \sum_{s \in S} \mu_{bs} = 1, \forall b \in B', s \in S)$  为  $b (b \in B')$  类信息对  $P_s^{PT}$  的隶属度。

### 2.4.2 模式识别

依照出行者对各类信息的偏好差异对各类信息赋权  $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{B'})$ ,  $0 < \omega_b < 1$  且  $\sum_{b \in B'} \omega_b = 1, \forall b \in B'$  则修正后的综合模糊匹配向量为:

$$C = \Omega \circ R = (c_1, c_2, \dots, c_S) \quad (2)$$

式中:  $c_s (s \in S)$  为综合模糊匹配度, “ $\circ$ ” 表示模糊识别运算符, “ $\circ$ ” 的定义决定了综合匹配模型的形式, “ $\circ$ ” 定义主要包括:  $M(\wedge, \vee)$ 、 $M(\cdot, \vee)$ 、 $M(\cdot, \oplus)$ 、 $M(\wedge, \oplus)$  型, 其中  $M(\wedge, \vee)$ 、 $M(\cdot, \vee)$  型仅识别主因, 忽略次因, 不适用于该匹配过程;  $M(\wedge, \oplus)$  型使影响因素过于集中, 其中 “ $\oplus$ ” 为有上界求和; 而  $M(\cdot, \oplus)$  因全面考虑了各因素对匹配的作用适用于本章研究, 则  $c_s$  按式(3)计算:

$$c_s = \omega_1 \mu_{1s} \oplus \omega_2 \mu_{2s} \oplus \dots \oplus \omega_{B'} \mu_{B's} = \min \left( 1, \sum_{b \in B'} \omega_b \mu_{bs} \right); s \in S \quad (3)$$

最后, 由求得  $C$  确定交通状态及发生概率, 完成模式识别。

## 3 MSTI 约束下的路径选择模型

分叉节点:  $i$  在如图 4 所示路网中的 OD (Origin-Destination) 对  $w$  间出行, 当  $w$  为 1 ~ 6 时, 由无环简单路径构成的备选路径集为  $K_w$  包括路径: 1-2-3-6、1-2-5-6、1-4-5-6、1-4-5-2-3-6 等, 其中  $K_w$  的构成直接影响选择概率, 本文仅考虑包含 4 节点的 3 条较短路径。设  $i$  选择最短路径 1-2-3-6 为偏好路径, 记为  $k_{w,i}^*$ 。当  $i$  在路段  $a$  获知路段  $b$  处于拥堵状态且  $d, g$  状态优于  $b, e$  时, 可能在节点 2 变更  $k_{w,i}^*$ , 则该路径变更点称为分叉节点。

以图 4 为例,  $i$  在 1 ~ 6 间出行, 存在 3 条备选路径  $\hat{k}_{w,i}^*$ 、 $\hat{k}_{w,i}'$ 、 $\hat{k}_{w,i}''$ , 其中  $\hat{k}_{w,i}^*$  可为  $w$  间的完整路径  $k_{w,i}^*$  或分叉节点之后

的后续偏好路径; 同理  $\hat{k}_{w,i}'$  ( $\hat{k}_{w,i}''$ ) 代表  $\hat{k}_{w,i}'$  ( $\hat{k}_{w,i}''$ ) 或分叉节点后的后续路径。进一步假设  $i$  在路径选择时, 仅将路径  $\hat{k}_{w,i}$  的理解行程时间  $t_{k,i}^{\text{travel},e}$  变量作为决策依据, 则  $\hat{k}_{w,i}$  的时变感知效用  $u_{k,i}$  的可观测部分  $v_{k,i} = z_{k,i} + \theta_t^{\text{travel}} \cdot t_{k,i}^{\text{travel},e}$ , 其中  $z_{k,i}$  为  $\hat{k}_{w,i}$  的固有哑元, 表示  $i$  在各类心理因素作用下对  $\hat{k}_{w,i}$  的偏好;  $\theta_t^{\text{travel}}$  为  $t_{k,i}^{\text{travel},e}$  的权重系数。

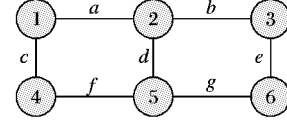


图4 路网网络图

设  $u_{k,i}$  的误差项  $\varepsilon_{k,i}$  服从独立同分布的 Gumbel 分布, 则  $\hat{k}_{w,i}$  的选择概率为:

$$P_{\hat{k},i} = \frac{\exp[\theta \cdot (z_{\hat{k},i} + \theta_t^{\text{travel}} \cdot t_{\hat{k},i}^{\text{travel},e})]}{\sum_{\hat{k}^m} \exp[\theta \cdot (z_{\hat{k}^m,i} + \theta_t^{\text{travel}} \cdot t_{\hat{k}^m,i}^{\text{travel},e})]} \quad (4)$$

式中,  $\theta$  与信息的准确程度及效度有关,  $\theta$  越大信息对  $i$  的约束能力越强。此外  $t_{k,i}^{\text{travel},e}$  的估算要基于出行者所获的 MSTI (详见 4.2.1 节及式(9))。

## 4 算例分析

### 4.1 原型匹配

#### 4.1.1 多源信息数据仿真

由于 MSTI 发布系统在我国尚未完善, 且通过调查的方法很难获取  $i$  实时接收的 MSTI, 因此借助微观交通仿真系统软件 VISSIM 模拟 MSTI 环境。

#### 1) 路网及交叉口构建。

算例路网原型选取原则为: ①  $Y_i$  内路网流量总体变化趋势较明显; ② 路网不包含或邻接易发生严重拥堵的路段; 基于此以 C 市某区域路网为原型构建如图 5 所示的算例路网, 3 交叉口口布局、渠化形式、车道宽度相同。对原型路网调查时间为: 周 1 至周 5 的工作日内的 6:50 ~ 9:10 时段。

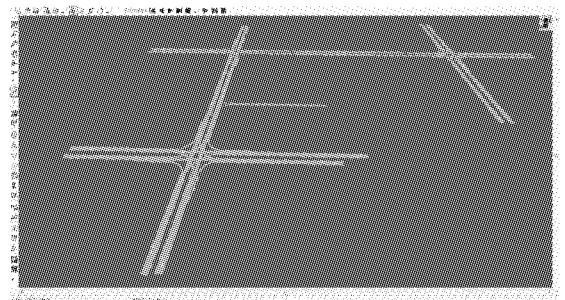


图5 算例路网形式

#### 2) 信号配时。信号周期、信号配时相同, 如图 6 所示。

#### 3) 数据采集间隔设置及路网流量输入。

为避免采集间隔内绿灯总时长分布不均对交通流特征变量采集的影响, 采集间隔取信号周期的整数倍, 同时为与信息刷新间隔保持一致, 设采集间隔为 300 s; 为体现流量的时变性、随机性, 流量输入间隔应为采集间隔的整数倍, 本文取 600 s。

#### 4) MSTI 组的构建及采集控制器的设置。

目前我国可实时发布的定量的交通信息主要有: 平均车速信息、路段拥挤程度信息及交通流量信息, 因此设 MSTI 由

此 3 类信息组成 ( $B = 3$ )。采集控制器位置及运行效果如图 8 所示。

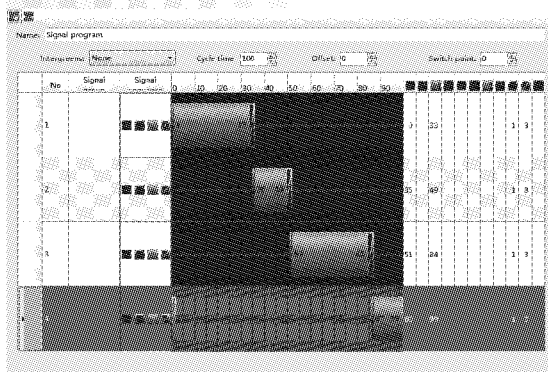


图 6 交叉口信号配时

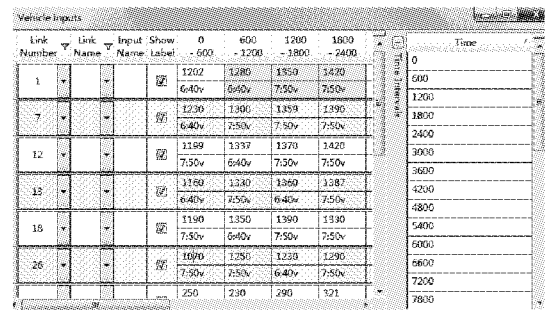


图 7 各路径实测数据录入

4.1.2 交通状态 PT 聚类结果

汇总处理后的数据如表 1 所示。

表 1 处理后的实时 MSTI 仿真数据

仿真时段/s	平均车速/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	占有 率/%	流量/ ( $\text{veh} \cdot 300 \text{ s}^{-1}$ )	仿真时段/s	平均车速/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	占有 率/%	流量/ ( $\text{veh} \cdot 300 \text{ s}^{-1}$ )
0 ~ 300				3 900 ~ 4 200	14.0	71.4	119
300 ~ 600	39.8	7.3	83	4 200 ~ 4 500	16.7	67.1	95
600 ~ 900	41.7	6.9	86	4 500 ~ 4 800	15.2	76.2	124
900 ~ 1 200	38.4	9.6	94	4 800 ~ 5 100	14.8	77.0	131
1 200 ~ 1 500	29.5	22.0	97	5 100 ~ 4 400	18.8	74.7	111
1 500 ~ 1 800	27.8	32.2	92	5 400 ~ 5 700	19.3	68.1	107
1 800 ~ 2 100	30.1	43.4	98	5 700 ~ 6 000	20.6	63.8	92
2 100 ~ 2 400	23.4	51.9	119	6 000 ~ 6 300	18.2	62.2	101
2 400 ~ 2 700	21.3	59.2	128	6 300 ~ 6 600	24.5	55.6	97
2 700 ~ 3 000	19.7	76.4	99	6 600 ~ 6 900	20.3	60.0	76
3 000 ~ 3 300	15.2	69.1	122	6 900 ~ 7 200	19.8	58.4	80
3 300 ~ 3 600	16.7	73.6	130	7 200 ~ 7 500	27.8	50.0	87
3 600 ~ 3 900	13.9	67.9	117				

4.1.3 模式识别算例验证

1) 基于一致性融合算法的  $\Omega$  值确定。

3 类信息对  $i$  的约束能力与其易理解性、准确性、个人偏好等因素有关,因此结合融合算法与专家调查法确定影响权重  $\Omega = (\omega_v, \omega_o, \omega_q)$ , 其中:  $\omega_v, \omega_o, \omega_q$  依次为速度、占有率、流量权重。让  $M$  个专家对速度、占有率及流量信息的约束能力评价,使用衰变函数计算专家间的支持度并建立支持度矩阵,具体步骤见文献[15]。基于融合算法的计算结果为:  $\omega_v = 0.439, \omega_o = 0.377, \omega_q = 0.184$ 。

2) 综合模糊匹配。

仿真开始时,车道占有率较低、车流接近自由流,不具备参考价值,因此保留 300 s ~ 7 500 s 时段采集的数据。此外,问卷调查结果显示,51% 受访者倾向于将日常交通状态分为 4 级,因此将交通状态分为较畅通、轻微拥挤、拥挤、拥堵。基于此编写 Matlab 程序,对表 1 数据模糊聚类<sup>[16]</sup>,结果如图 9 所示。

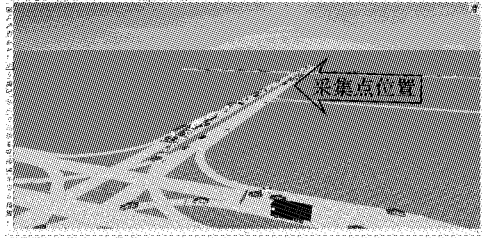


图 8 采集点位置及运行效果

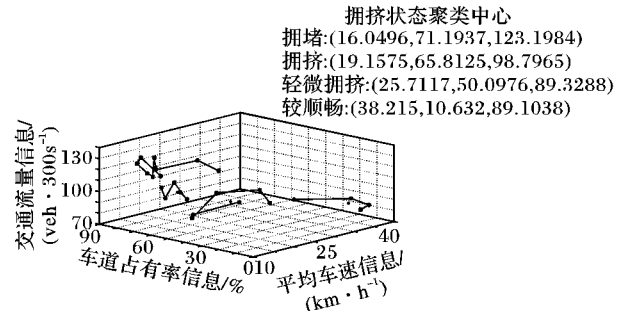


图 9 交通状态聚类中心

图 9 中 4 组曲线由上至下依次代表拥堵状态、拥挤状态、轻微拥挤状态及较顺畅状态,对应的聚类中心依次为  $g_1, g_2, g_3, g_4$ ; 各级聚类中心的坐标依次由速度、占有率、流量构成。

(1) 交通状态 PT 隶属函数。

速度、占有率及流量对拥挤状态 PT 的隶属函数曲线如图 10 ~ 12 所示。

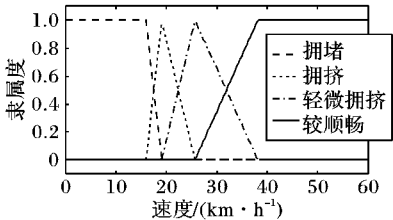
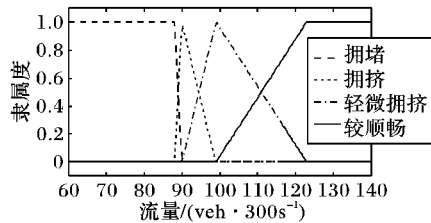
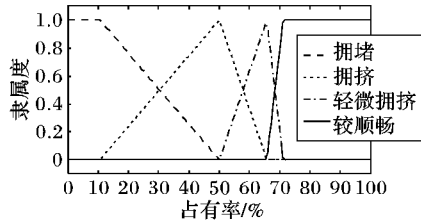


图 10 速度隶属函数曲线

(2) 综合模糊匹配。

由图 10~12 可计算出  $x_j$  的模糊匹配矩阵  $R$ , 将  $\Omega = (\omega_r, \omega_o, \omega_q)$  代入式(2) 求出综合模糊匹配值  $C = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ , 确定交通状态及状态发生概率。



## 4.2 路径选择

### 4.2.1 实验设计

选取如图 13 所示的实际路段, 对小汽车出行者进行问卷调查, 即路径在不同拥挤状态下出行者的路径选择情况。

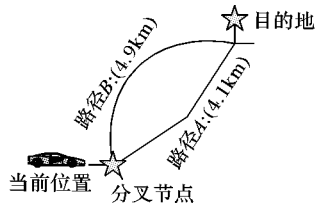


图 13 SP 调查中构建的路径

考虑  $Y_t$  时段路径 A、B 的 4 种常见情形。情形 1: A 轻微拥挤, B 较顺畅; 情形 2: A 拥挤, B 轻微拥挤; 情形 3: A 拥堵, B 轻微拥挤; 情形 4: A 拥堵, B 拥挤。为模拟 4 种情形, 取 MSTI 组  $\xi_A^1 = (28.837585, 40.2312, 89.27255)$ ,  $\xi_B^1 = (36.96467, 14.57856, 89.1263)$ ,  $\xi_A^1, \xi_B^1$  分别表示 A、B 在情形 1 所获实时信息; 同理 A、B 在情形 2 所获实时信息为  $\xi_A^2 = (22.10689, 58.7408, 94.53604)$ ,  $\xi_B^2 = (33.83885, 24.44496, 89.18255)$ ; 以此类推得  $\xi_A^3 = (17.13737, 69.31028, 114.6577)$ ,  $\xi_B^3 = (22.76231, 57.16931, 93.58927)$ ;  $\xi_A^4 = (16.6718, 70.11746, 118.318)$ ,  $\xi_B^4 = (17.29276, 69.04122, 113.4376)$ 。根据图 10~12 的隶属曲线, 求得情形 1~4 中路径 A、B 的拥挤状态, 三角形、梯形隶属度计算公式见文献[13], 计算结果如表 2 所示。

表 2 4 种情形下路径 A、B 的状态及发生概率

线路	情形 1		情形 2		情形 3		情形 4	
	状态	概率/%	状态	概率/%	状态	概率/%	状态	概率/%
A	$a_3$	75	$a_2$	55	$a_1$	65	$a_1$	80
	$a_4$	25	$a_3$	45	$a_2$	35	$a_2$	20
B	$a_3$	10	$a_3$	65	$a_2$	45	$a_1$	55
	$a_4$	90	$a_4$	35	$a_3$	55	$a_2$	35

$a_1, a_2, a_3, a_4$  状态下 (A、B) 行程时间期望约为: (17 min, 19 min)、(14 min, 16 min)、(11 min, 12 min)、(8 min, 9 min)。 $t_{k,i}^{travel,e}$  可按式(9)计算:

$$t_{k,i}^{travel,e} = \sum_{aj} \bar{t}_{k,aj}^{travel,e} \cdot p_{aj}; j = 1, 2, \dots, 4 \quad (9)$$

式中:  $\bar{t}_{k,aj}^{travel,e}$  表示  $\hat{k}_{w,i}$  在  $a_j$  状态下的行程时间期望;  $p_{aj}$  表示  $a_j$  发生概率。

在实际路段随机选取 152 位驾驶员进行意向调查, 即调查 A、B 均处于顺畅状态时出行者的偏好路径及在 1~4 情形下出行者的路径选择情况, 回收有效问卷 122 份, 共得 488 个可用于模型评估的样本; 有效问卷的调查显示: A、B 顺畅时出行者均视 A 为偏好路径, 且 4 种情形下路径选择统计结果如表 3 所示。

表 3 4 种情形下路径选择结果统计

出行情形	路径 A		路径 B	
	频数	百分比/%	频数	百分比/%
情形 1	60	49.18	62	50.82
情形 2	31	25.41	91	74.59
情形 3	20	16.39	102	83.61
情形 4	35	28.69	87	71.31

### 4.2.2 估计结果及分析

确定 4 种情形下线路 A、B 的  $t_{A,i}^{travel,e}$ 、 $t_{B,i}^{travel,e}$ , 并将其与表 3 路径选择结果统计值一并代入式(4) 标定 4 种情形下的参数值, 其中  $\theta$  取 1。

表 4 4 种情形下的标定结果

情形	$t_{A,i}^{travel,e} / \text{min}$	$t_{B,i}^{travel,e} / (\text{min})$	$Z_{A,i}$	$Z_{B,i}$	$\theta_t^{travel}$
1	10.25	9.30	$4.93\text{E}-016$	—	-0.069
2	12.65	10.95	$1.01\text{E}-016$	—	-0.633
3	15.59	13.80	$-1.67\text{E}-018$	—	-0.910
4	16.40	16.05	$-2.04\text{E}-015$	—	-2.490

从表 4 中知: ①  $t_{A,i}^{travel,e}$ 、 $t_{B,i}^{travel,e}$  的参数  $\theta_t^{travel} < 0$ , 且  $t_{A,i}^{travel,e}$ 、 $t_{B,i}^{travel,e}$  均  $> 0$ , 表明感知行程时间为负效用, 符合实际; ②情形 1、2 下,  $z_{A,i} > 0$ , 表明  $i$  对偏好路径 A 具有一定的忠诚度; 情形 1 下,  $\theta_t^{travel}$  绝对值较小, 表明 A 较顺畅时,  $i$  对行程时间关注度低, 倾向于坚持 A; 情形 2 下,  $i$  对 A 忠诚度略有下降, 对行程时间关注度提高, 表明拥挤不严重时  $i$  仍具备坚持 A 的倾向; 该“安于现状”的心理使实际路网很难达到实时的 Wordrop 平衡。③情形 3、4 下,  $z_{A,i} < 0$ , 表明随着 A 对拥堵状态隶属度的增加,  $i$  对 A 的忠诚度迅速下降, 并达到负值, 表明  $i$  此刻努力避免陷入拥挤状态的心理; 随着 A 拥挤加剧,  $\theta_t^{travel}$  的绝对值迅速增大, 表明当 A 处于拥堵状态时,  $i$  对行程时间异常敏感, 此急于“摆脱窘境”的心理可能促使  $i$  盲目地从一条拥挤路径 A 大量转向另一拥挤路径 B 的现象产生。

## 5 结语

在 MSTI 环境中出行者能够更准确地了解实时路网状态, 并根据自身需求更频繁地调整出行选择决策。为此本文首先分析了信息的约束机理, 提出原型匹配模型、交通状态辨识模型描述 MSTI 环境下的交通状态辨识的心理过程; 在此基础上研究 MSTI 环境下出行者的路径选择行为, 在算例中发现, 当偏好路径拥挤不严重时, 出行者对路径间的行程时间差不敏感, 坚持偏好路径概率较大, 此时 MSTI 的约束力较小; 当偏好路径拥堵时, 出行者变更偏好路径的概率激增, 甚至发生盲目变更行为, 此时 MSTI 对出行决策产生较强的约

束力; MSTI 发布有助于提高出行质量及路网运行效率, 使路径实时流量分配有向 Wordrop 平衡状态发展的趋势, 但在出行者不完全理性决策行为影响下路径流量很难达到真正平衡。因此信息技术引进、可靠的交通管理规则制定等均要基于对出行者心理研究。

#### 参考文献:

- [1] AXHAUSEN K W, GARLING T. Activity-based approaches to travel analysis: conceptual frameworks, models, and research problems [J]. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 1992, 12(4): 323 - 341.
- [2] CAPLICE C, MAHMASSANI H S. Aspects of commuting behavior: preferred arrival time, use of information and switching propensity [J]. *Transportation Research Part A*, 1992, 26(5): 409 - 418.
- [3] KHATTAK A, POLYDOROPOULOU A, BEN-AKIVA M. Modeling revealed and stated en-route travel response to advanced traveler information systems [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996, 1537(1): 46 - 54.
- [4] MAHMASSANI H S, LIU Y H. Dynamics of commuting decision behavior under advanced traveler information systems [J]. *Transportation Research C*, 1999, 7(23): 91 - 107.
- [5] SRINIVASAN K, MAHMASSANI S H. Modeling inertia and compliance mechanism in route choice behavior under real-time information [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2000, 1725(1): 45 - 53.
- [6] PEETA S, GEDELA S. Real-time variable message sign-based route guidance consistent with driver behavior [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1752(1): 117 - 125.
- [7] SRINIVASAN K K, MAHMASSANI H S. Analyzing heterogeneity and unobserved structural effects in route-switching behavior under atis: a dynamic kernel logit formulation [J]. *Transportation Research Part B*, 2003, 37(9): 793 - 814.
- [8] PEETA S, JEONG W Y. A hybrid model for driver route choice incorporating en-route attributes and real-time information effects [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2005, 5(1): 21 - 40.
- [9] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decisions under risk [J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1979, 47(2): 263 - 291.
- [10] ZHONG Y. Principles of information science [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1996. (钟义信. 信息科学原理 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1996.)
- [11] WANG S, WANG A. Cognitive psychology [M]. Beijing: Peking University Press, 2006. (王甦, 汪安圣. 认知心理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.)
- [12] GAO X. Basic psychology series. Perceptual psychology [M]. Beijing: People's Education Press, 2011. (高湘萍. 基础心理学书系: 知觉心理学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2011.)
- [13] GAO X. Fuzzy cluster analysis and its applications [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (高新波. 模糊聚类分析及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.)
- [14] SIMON H A. How big is a chunk? [J]. *Science*, 1974, 183(4124): 482 - 488.
- [15] GUO H, HAN X, LIU L, et al. Study on measuring of drivers' traffic safety behavior reliability risks [J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(6): 103 - 109. (郭洪洋, 韩雪松, 刘澜, 等. 驾驶员交通安全行为可靠性风险度量研究 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 103 - 109.)
- [16] LOU X, LI J, LIU H. Improved fuzzy C-means clustering algorithm based on distance correction [J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(3): 646 - 648. (楼晓俊, 李隽颖, 刘海涛. 距离修正的模糊 C 均值聚类算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32(3): 646 - 648.)

(上接第 2092 页)

染色体编码的方式相比, 缩减了染色体长度, 而且其解码算法没有增加解码求解目标值的时间复杂度。设计了 1 种单亲换位操作和 3 种变异操作来搜索问题的解, 避免了传统的交叉和变异操作破坏染色体可行解的缺陷, 在一定程度上也阻止了早熟收敛现象的发生。通过算例验证, 可以看到所建立的鲁棒模型在不确定环境下能得到较好的鲁棒解。在后续的研究中, 将研究带有复杂约束的车辆路径问题的鲁棒模型及其求解方法。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG J, TIAN B, LI X. Solving TSP with improved multi-Agent genetic algorithm [J]. *Journal of Computer Applications*, 2008, 28(4): 954 - 956. (张继军, 田宝国, 李萧. 用改进的多智能体遗传算法求解旅行商问题 [J]. 计算机应用, 2008, 28(4): 954 - 956.)
- [2] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness [J]. *Operations Research*, 2004, 52(1): 35 - 53.
- [3] SOYSTER A L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming [J]. *Operations Research*, 1973, 21(5): 1154 - 1157.
- [4] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust convex optimization [J]. *Mathematics of Operations Research*, 1998, 23(4): 769 - 805.
- [5] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust solutions to uncertain linear programs [J]. *Operations Research Letters*, 1999, 25(1): 1 - 13.
- [6] BEN-TAL A, GORYASHKO A, GUSLITZER E, et al. Adjustable robust solutions of uncertain linear programs [J]. *Mathematical Programming*, 2004, 99(2): 351 - 376.
- [7] MULVEY J M, VANDERBEI R J, ZENIOS S A. Robust optimization of large-scale systems [J]. *Operational Research*, 1995, 43(2): 264 - 281.
- [8] MULVEY J M, RUSZCZYNSKI A. A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization [J]. *Operational Research*, 1995, 43(3): 477 - 490.
- [9] MA C. Optimization of emergency transportation and logistics system [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Publishing House, 2014. (马昌喜. 应急交通与物流系统优化 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2014.)
- [10] SONG H. A partheno-genetic algorithm for solving the degree-constrained minimum spanning tree problem [J]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2005, 29(4): 61 - 66. (宋海洲. 求解度约束最小生成树的单亲遗传算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2005, 29(4): 61 - 66.)
- [11] WANGX, WUY. Optimal algorithm for coding and decoding Prüfer codes [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2008, 29(4): 687 - 690. (王晓东, 吴英杰. Prüfer 编解码的最优算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(4): 687 - 690.)
- [12] TSPLIB [EB/OL]. [2014-03-11]. <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/tsp/>.