

弹性需求下的双向混合交通需求预测组合模型^{*}

A Model of Forecast Combination for Two-way Mixed Traffic Demand Under Elastic Demand

陈巧萍, 韦增欣, 梁碧清, 陈进来

CHEN Qiao-ping, WEI Zeng-xin, LIANG Bi-qing, CHEN Jin-lai

(广西大学数学与信息科学学院, 广西南宁 530004)

(School of Mathematics and Information Science, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:基于我国城市道路双向混合行驶现状及实际交通网络的运行特点,借助 Logit 路径选择模型,建立弹性需求下双向混合交通需求预测组合模型.证明了模型的一阶条件等价性,给出其具体的求解算法并用算例说明该模型是有效的.

关键词:双向混合交通 弹性需求 随机用户平衡

中图分类号:O29,U491 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2011)02-0129-04

Abstract:Based on the operational features of the mixed driving on two-way urban road and the actual traffic network in China, a forecasting combinational model is builded for the two-way mixed traffic demand under the elastic demand by means of Logit path choice model. Its first-order equivalence is proved, its specific algorithm is given and the example which shows that the model is effective.

Key words: two-way mixed-traffic, elastic demand, stochastic user equilibrium

城市交通需求预测是城市交通规划中一个重要的环节,是合理进行城市交通规划的关键.现存主要有集聚分析和非集聚分析两类方法预测研究城市交通需求.1977年 Dagazno 和 Sheffi 给出随机用户平衡配流准则^[1,2].1980年, Fisk 提出固定需求下随机用户平衡配流模型及算法^[1].针对单模式交通,周晶^[3]研究弹性需求下的随机用户平衡配流问题;罗文昌^[4]给出求解弹性需求配流问题的具体算法并通过算例证明算法的有效性;杜进有^[5]研究了出行分布和交通分配问题,有效克服了需求函数具有可分离的局限性.而在我国城市道路中,有很多路段机动车与非机动车混合单向行驶,影响路段阻抗函数的主要是本向车流.为此针对单向对混合交通,罗文昌^[6]提出对称型的混合交通随机用户平衡配流模型及算法并在文献^[7]中研究 OD 分布与随机用户平衡分配的组合

模型.周溪召^[8]等也对随机平衡分配的组合模型进行了一些研究.而在城市道路中,不同的道路允许行驶的车辆和方向不同.为此,四兵锋^[9]针对不同路段研究影响路段阻抗函数的因素并构造了相应的路段阻抗函数.在我国城市道路中,混合交通是典型的运行特点,文献^[10]曾对该问题的形成进行了分析.

在城市道路中,单辐路段^[9]是典型的混合交通,影响路段阻抗函数的因素不仅有本向车流,还有对向车流.文献^[11,12]研究了双向混合交通单约束的运量分布与双约束的运量分布及用户均衡配流.而 Wardrop 用户平衡配流的前提是假定出行者能够准确掌握整个路网的状况并能精确计算最小路径阻抗,这与实际情况不符合.同时,在实际交通网络中,当网络中两个节点间的拥挤程度增加时,有些用户就会改变出行计划,如改变出行时间、出行目的地或出行路径,甚至取消出行,导致需求量减少.这说明在整个交通网络中交通需求是弹性的.

本文基于出行者对路径阻抗的理解有偏差及出行需求是变动的,结合双向混合交通的特点,采用集成建模的方法构造等价的数学规划模型并证明模型

收稿日期:2010-10-13

修回日期:2011-01-06

作者简介:陈巧萍(1985-),女,硕士研究生,主要从事优化与管理,交通与物流管理工作。

^{*}国家自然科学基金项目(10761001)资助。

的一阶条件等价性. 该模型对我国城市交通规划有一定借鉴意义.

1 混合交通需求预测组合模型

文中用 x_a, x_a^* 分别表示路段 a 上本向机动车与对向机动车的流量; \hat{x}_a, \hat{x}_a^* 分别表示路段 a 上本向非机动车与对向非机动车的流量; f_k^r, \hat{f}_k^r 分别表示 OD 对 $r \sim s$ 之间路径 k 上机动车与非机动车的流量; q^r, \hat{q}^r 分别表示 OD 对 $r \sim s$ 之间机动车与非机动车的交通需求量; 如果弧 a 在连接 OD 对 $r \sim s$ 之间的路径 k 上, δ_{ak}^r 值为 1, 否则为 0; $t_a(x_a, x_a^*, \hat{x}_a)$ 表示路段 a 上本向机动车的阻抗; $\hat{t}_a(\hat{x}_a, \hat{x}_a^*, x_a)$ 表示路段 a 上本向非机动车的阻抗; $t_a^*(x_a^*, \hat{x}_a^*, x_a)$ 表示路段 a 上对向机动车的阻抗; $\hat{t}_a^*(\hat{x}_a^*, x_a^*, \hat{x}_a)$ 表示路段 a 上对向非机动车的阻抗; C_k^r, \hat{C}_k^r 分别表示 OD 对 $r \sim s$ 之间路径 k 上机动车与非机动车的理解阻抗; c_k^r, \hat{c}_k^r 分别表示 OD 对 $r \sim s$ 之间路径 k 上机动车与非机动车的实际阻抗; S_r, \hat{S}_r 分别表示 OD 对 $r \sim s$ 之间机动车与非机动车的期望理解最小出行阻抗.

为计算方便, 还假定

$$\frac{\partial t_a(x_a, x_a^*, \hat{x}_a)}{\partial x_a} = \frac{\partial \hat{t}_a(\hat{x}_a, \hat{x}_a^*, x_a)}{\partial x_a},$$

$$\frac{\partial t_a(x_a, x_a^*, \hat{x}_a)}{\partial x_a^*} = \frac{\partial \hat{t}_a^*(x_a^*, \hat{x}_a^*, x_a)}{\partial x_a}, \quad \forall a, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \hat{t}_a(\hat{x}_a, \hat{x}_a^*, x_a)}{\partial \hat{x}_a} = \frac{\partial \hat{t}_a^*(\hat{x}_a^*, x_a^*, \hat{x}_a)}{\partial \hat{x}_a},$$

$$\frac{\partial \hat{t}_a^*(x_a^*, \hat{x}_a^*, x_a)}{\partial \hat{x}_a^*} = \frac{\partial \hat{t}_a^*(\hat{x}_a^*, x_a^*, \hat{x}_a)}{\partial \hat{x}_a^*}, \quad \forall a. \quad (2)$$

利用随机效用模型^[1]研究路径选择条件. 设 $C_l^r = c_l^r - \frac{1}{\theta} \varepsilon_l^r$, 其中 ε_l^r 服从参数为 θ 的 Gumbel 分布.

设任意 OD 对 $r \sim s$ 之间所有使用机动车的出行者认为路径 k 的阻抗最小, 则选择路径 k 的概率为 $P_k = P(C_k^r = \min_l C_l^r)$ 或 $P_k = P(C_k^r \leq C_l^r, \forall k \neq l)$. 计算得

$$P_k = \frac{e^{-\theta c_k^r}}{\sum_l e^{-\theta c_l^r}} \Rightarrow f_k^r = q_r^r \frac{e^{-\theta c_k^r}}{\sum_l e^{-\theta c_l^r}}. \quad (3)$$

同理可得, 任意 OD 对 $r \sim s$ 之间所有使用非机动车的出行者选择路径 k 的概率为

$$\hat{P}_k = \frac{e^{-\theta \hat{c}_k^r}}{\sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^r}} \Rightarrow \hat{f}_k^r = \hat{q}_r^r \frac{e^{-\theta \hat{c}_k^r}}{\sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^r}}, \quad (4)$$

其中 $S_r(C_r) = E(\min_l C_l^r) = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta c_l^r}$,

$\hat{S}_r(\hat{C}_r) = E(\min_l \hat{C}_l^r) = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^r}$.

(3)式和(4)式即为混合交通随机用户平衡状态时所

满足的路径选择条件.

设 $q_{rs} = Q_{rs}(S_{rs}(C_{rs})) = \overline{Q_{rs}} e^{-\beta(S_{rs}(C_{rs}))}$ ^[4], $\hat{Q}_{rs} = \hat{Q}_{rs}(\hat{S}_{rs}(\hat{C}_{rs})) = \overline{\hat{Q}_{rs}} e^{-\beta(\hat{S}_{rs}(\hat{C}_{rs}))}$, 其中 $\overline{Q_{rs}}, \overline{\hat{Q}_{rs}}$ 表示 OD 对 $r \sim s$ 之间机动车与非机动车的最大出行需求量, $\beta, \hat{\beta}$ 分别表示机动车和非机动车出行需求量对期望最小路径阻抗的灵敏度. 建立等价的数学规划模型(P)如下:

$$(P): \min Z(x, x^*, \hat{x}, \hat{x}^*, f, \hat{f}, q, \hat{Q}) = G(x, x^*, \hat{x}, \hat{x}^*) + P(f, \hat{f}, q, \hat{Q})$$

$$\text{st. } \sum_l f_l^r = q_{rs}, \forall r, s(u_{rs}), \quad (5)$$

$$\sum_l \hat{f}_l^r = \hat{Q}_{rs}, \forall r, s(\hat{u}_{rs}), \quad (6)$$

$$x_a = \sum_{r,s} \sum_l f_l^r \delta_{al}^r, \forall a, \quad (7)$$

$$\hat{x}_a = \sum_{r,s} \sum_l \hat{f}_l^r \delta_{al}^r, \forall a, \quad (8)$$

$$x_a^* = \sum_{r,s} \sum_l f_l^r \delta_{a^*l}^r, \forall a^*, \quad (9)$$

$$\hat{x}_a^* = \sum_{r,s} \sum_l \hat{f}_l^r \delta_{a^*l}^r, \forall a^*, \quad (10)$$

$f_l^r \geq 0, \hat{f}_l^r \geq 0, q_{rs} \geq 0, \hat{q}_{rs} \geq 0 \forall r, s, l, x_a \geq 0, \hat{x}_a \geq 0, x_a^* \geq 0, \hat{x}_a^* \geq 0, \forall a$. 其中 a^* 表示路段 a 的反方向, u_{rs}, \hat{u}_{rs} 是(3)式和(4)式对应的拉格朗日乘子, $x = (\dots x_a \dots), \hat{x} = (\dots \hat{x}_a \dots), x^* = (\dots x_a^* \dots), \hat{x}^* = (\dots \hat{x}_a^* \dots), f = (\dots f_k^r \dots), \hat{f} = (\dots \hat{f}_k^r \dots), q = (\dots q_{rs} \dots), \hat{Q} = (\dots \hat{q}_{rs} \dots)$. $G(x, x^*, \hat{x}, \hat{x}^*)$ 和 $P(f, \hat{f}, q, \hat{Q})$ 满足下式:

$$G(x, x^*, \hat{x}, \hat{x}^*) = \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w, x_a^*, \hat{x}_a) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w, x_a^*, 0) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w, 0, \hat{x}_a) dw + \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w, 0, 0) dw + \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a(w, \hat{x}_a^*, x_a) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a(w, \hat{x}_a^*, 0) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a(w, 0, x_a) dw + \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a(w, 0, 0) dw + \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} t_a^*(w, \hat{x}_a^*, x_a) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} t_a^*(w, \hat{x}_a^*, 0) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} t_a^*(w, 0, x_a) dw + \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} t_a^*(w, 0, 0) dw + \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a^*(w, x_a^*, \hat{x}_a) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a^*(w, x_a^*, 0) dw + \frac{1}{6} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a^*(w, 0, \hat{x}_a) dw + \frac{1}{3} \sum_a \int_0^{x_a} \hat{t}_a^*(w, 0, 0) dw,$$

$$P(f, \hat{f}, q, \hat{Q}) = \frac{1}{\theta} \sum_{r,s} \sum_k \left(\int_0^{f_k^r} \ln x dx + \int_0^{\hat{f}_k^r} \ln x dx \right) - \frac{1}{\theta} \sum_{r,s} \left(\int_0^{q_{rs}} \ln x dx + \int_0^{\hat{q}_{rs}} \ln x dx \right) - \sum_{r,s} \int_0^{q_{rs}} Q_{rs}^{-1}(x) dx - \sum_{r,s} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \hat{Q}_{rs}^{-1}(x) dx.$$

2 模型的一阶条件等价性

由最优化原理^[13]知,只需证明模型(P)的一阶条件与随机用户路径选择条件等价,即可知模型(P)的一阶条件等价于它的拉格朗日函数极小的一阶条件.

构造模型(P)的拉格朗日函数:

$$L(\cdot) = Q(\cdot) + P(\cdot) + \sum_{r,s} u_{rs} (q_{rs} - f_k^{rs}) + \sum_{r,s} \hat{u}_{rs} (\hat{q}_{rs} - \hat{f}_k^{rs}). \quad (11)$$

$L(\cdot)$ 对 f_k^{rs}, q_{rs} 进行求导得

$$\frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} = \frac{\partial Q}{\partial f_k^{rs}} + \frac{\partial P}{\partial f_k^{rs}} - u_{rs}, \quad \frac{\partial L}{\partial q_{rs}} = \frac{\partial P}{\partial q_{rs}} + u_{rs}. \quad (12)$$

计算得

$$\frac{\partial P}{\partial f_k^{rs}} = \frac{1}{\theta} \ln f_k^{rs}, \quad \frac{\partial Q}{\partial f_k^{rs}} = c_k^{rs} \quad [12]. \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式得 $\frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} = c_k^{rs} + \frac{1}{\theta} \ln f_k^{rs} - u_{rs}$,

$$\frac{\partial L}{\partial q_{rs}} = -\frac{1}{\theta} \ln q_{rs} - Q_{rs}^{-1}(q_{rs}) + u_{rs}.$$

所以 $L(\cdot)$ 对 f_k^{rs} 进行求导所得一阶条件为

$$(c_k^{rs} + \frac{1}{\theta} \ln f_k^{rs} - u_{rs}) \cdot f_k^{rs} = 0, \quad \forall r, s, k, \quad (14)$$

$$c_k^{rs} + \frac{1}{\theta} \ln f_k^{rs} - u_{rs} \geq 0. \quad (15)$$

$L(\cdot)$ 对 q_{rs} 进行求导所得一阶条件为

$$(-\frac{1}{\theta} \ln q_{rs} - Q_{rs}^{-1}(q_{rs}) + u_{rs}) \cdot q_{rs}, \quad \forall r, s, k, \quad (16)$$

$$-\frac{1}{\theta} \ln q_{rs} - Q_{rs}^{-1}(q_{rs}) + u_{rs} \geq 0. \quad (17)$$

因为 $\ln f_k^{rs}$ 存在,所以 $f_k^{rs} > 0$,由(14)式得

$$c_k^{rs} + \frac{1}{\theta} \ln f_k^{rs} - u_{rs} = 0 \Rightarrow f_k^{rs} = e^{\theta u_{rs}} \cdot e^{-\theta c_k^{rs}}. \quad (18)$$

将(18)式代入(5)式可得

$$e^{\theta u_{rs}} = \frac{q_{rs}}{\sum_l e^{-\theta c_l^{rs}}}. \quad (19)$$

将(19)式代入(18)式可得

$$f_k^{rs} = q_{rs} \frac{e^{-\theta c_k^{rs}}}{\sum_l e^{-\theta c_l^{rs}}}. \quad (20)$$

同理可求得

$$\hat{f}_k^{rs} = \hat{q}_{rs} \frac{e^{-\theta \hat{c}_k^{rs}}}{\sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rs}}}. \quad (21)$$

由于 $\ln q_{rs}$ 存在,故 $q_{rs} > 0$.由(16)式可得

$$-\frac{1}{\theta} \ln q_{rs} - Q_{rs}^{-1}(q_{rs}) + u_{rs} = 0 \Rightarrow e^{\theta u_{rs}} = q_{rs} \cdot e^{\theta Q_{rs}^{-1}(q_{rs})}. \quad (22)$$

由(19)式和(22)式可得 $q_{rs} = Q_{rs}(-\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta c_l^{rs}})$. 同

理可得 $\hat{q}_{rs} = \hat{q}_{rs}(-\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rs}})$.

(20)式和(21)式表明模型(P)的一阶条件与随机用户平衡路径选择条件等价,即模型的解满足随机用户平衡路径选择条件.

3 模型求解算法

模型(P)的求解算法步骤:

步骤1 对任意的 OD 对 $r \sim s$, 确定有效路径集合 R_{rs} , 令 $n = 0$.

步骤2 初始化. 对任意的 OD 对 $r \sim s$,

1) 由 $\{(t_a(0,0,0), \hat{t}_a(0,0,0), \forall a)\}$ 计算有效路径的阻抗 $\{c_l^{rs}, \forall l \in R_{rs}\}$ 和 $\{\hat{c}_l^{rs}, \forall l \in R_{rs}\}$.

2) 根据 $S_{rs}(C_{rs}) = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta c_l^{rs}}, \hat{S}_{rs}(\hat{C}_{rs}) = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rs}}$ 计算 $S_{rs}(C_{rs}), \hat{S}_{rs}(\hat{C}_{rs})$.

3) 由 $q_{rs,1} = Q_{rs}(-\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta c_l^{rs}}), \hat{q}_{rs,1} = \hat{Q}_{rs}(-\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rs}})$ 计算 $q_{rs,1}, \hat{q}_{rs,1}$.

4) $\forall k \in R_{rs}$, 由 $f_{k1}^{rs} = q_{rs,1} \frac{e^{-\theta c_k^{rs}}}{\sum_{l \in R_{rs}} e^{-\theta c_l^{rs}}}, \hat{f}_{k1}^{rs} = \hat{q}_{rs,1} \frac{e^{-\theta \hat{c}_k^{rs}}}{\sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rs}}}$ 计算路径流量 $f_{k1}^{rs}, \hat{f}_{k1}^{rs}$.

5) 对 $\forall a$, 由(7)~(10)式计算初始路段流量 $x_{a1}, \hat{x}_{a1}, x_{a1}^*, \hat{x}_{a1}^*$, 令 $n = 1$.

步骤3 对任意的 OD 对 $r \sim s$,

1) 由 $t_a(x_{na}, \hat{x}_{na}, x_{na}^*, \forall a), \hat{t}_a(\hat{x}_{na}, \hat{x}_{na}, \hat{x}_{na}^*, \forall a)$ 计算有效路径的阻抗 $\{c_k^{rsn}, \forall k \in R_{rs}\}$ 和 $\{\hat{c}_k^{rsn}, \forall k \in R_{rs}\}$.

2) 由 $S_{rsn}(C_{rsn}) = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta c_l^{rsn}}, \hat{S}_{rsn}(\hat{C}_{rsn}) = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rsn}}$ 计算 $S_{rsn}(C_{rsn}), \hat{S}_{rsn}(\hat{C}_{rsn})$.

3) 由 $v_{rs,n} = Q_{rs}(-\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta c_l^{rsn}}), \hat{v}_{rs,n} = \hat{Q}_{rs}(-\frac{1}{\theta} \ln \sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rsn}})$ 计算 $v_{rs,n}, \hat{v}_{rs,n}$.

4) 对 $\forall k \in R_{rs}$, 由 $h_{k,n}^{rs} = v_{rs,n} \frac{e^{-\theta c_k^{rsn}}}{\sum_l e^{-\theta c_l^{rsn}}}$ 和 $\hat{h}_{k,n}^{rs} = \hat{v}_{rs,n} \frac{e^{-\theta \hat{c}_k^{rsn}}}{\sum_l e^{-\theta \hat{c}_l^{rsn}}}$ 计算新的路径流量 $h_{k,n}^{rs}, \hat{h}_{k,n}^{rs}$. 并由(7)~

(10)式计算新的路段流量 $y_{an}, \hat{y}_{an}, y_{an}^*, \hat{y}_{an}^*$.

步骤4 令 $x_{a,n+1} = x_{an} + \alpha(y_{an} - x_{an}), \hat{x}_{a,n+1} =$

$$\hat{x}_{an} + \alpha(\hat{y}_{an} - \hat{x}_{an}), x_{a,n+1}^* = x_{an}^* + \alpha(y_{an}^* - x_{an}^*), \hat{x}_{a,n+1}^* = \hat{x}_{an}^* + \alpha(\hat{y}_{an}^* - \hat{x}_{an}^*), q_{rs,n+1} = q_{rs,n} + \alpha(v_{rs,n} - q_{rs,n}), \hat{Q}_{rs,n+1} = \hat{Q}_{rs,n} + \alpha(\hat{v}_{rs,n} - \hat{Q}_{rs,n}), \text{其中 } \alpha = \frac{1}{n}.$$

步骤5 收敛性检查.

对任意的 OD 对 $r \sim s, \forall \epsilon > 0$, 若

$$\sum_k |x_{a,n+1}^* - x_{an}^*| / x_{an}^* < \epsilon, \sum_k |\hat{x}_{a,n+1} - \hat{x}_{an}| / \hat{x}_{an} < \epsilon, \sum_k |x_{a,n+1}^* - x_{an}^*| / x_{an}^* < \epsilon, \sum_k |\hat{x}_{a,n+1}^* - \hat{x}_{an}^*| / \hat{x}_{an}^* < \epsilon, \sum_{r,s} |q_{rs,n+1} - q_{rs,n}| / q_{rs,n} < \epsilon, \sum_{r,s} |\hat{Q}_{rs,n+1} - \hat{Q}_{rs,n}| / \hat{Q}_{rs,n} < \epsilon, \text{停止迭代; 否则, 令 } n = n + 1, \text{转步骤 3.}$$

4 算例

如图 1 所示的 OD 对(1,3), 有 3 个节点. 已知路段 1 机动车与非机动车混合双向行驶. 设 $t_1, \hat{t}_1, t_1^*, \hat{t}_1^*$ 分别表示路段 1 上本向机动车、本向非机动车、对向机动车、对向非机动车的阻抗. 阻抗函数形式为 $t = Ax_1 + B\hat{x}_1 + Cx_1^* + D\hat{x}_1^* + E$, 对应的参数见表 1.

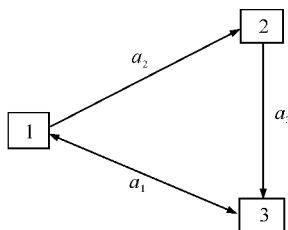


图 1 OD 对(1,3)

Fig. 1 OD pair(1,3)

表 1 各阻抗函数对应的参数

Table 1 Parameters of impedance function

t	A	B	C	D	E
t_1	4	2	2	0	2
\hat{t}_1	2	3	0	1	3
t_1^*	2	0	3	2	3
\hat{t}_1^*	0	1	2	3	4

路段 2 和 3 机动车与非机动车混合单向行驶, 对应的阻抗函数分别为

$$t_2(x_2, \hat{x}_2) = 3x_2 + 2\hat{x}_2 + 1, \hat{t}_2(x_2, \hat{x}_2) = 2x_2 + 4\hat{x}_2 + 3,$$

$$t_3(x_3, \hat{x}_3) = 4x_3 + 3\hat{x}_3 + 2, \hat{t}_3(x_3, \hat{x}_3) = 3x_3 + 5\hat{x}_3 + 4.$$

已知 $Q_{13} = 40, \hat{Q}_{13} = 60, \theta = 0.1, \epsilon = 0.01, \beta =$

$0.2, \hat{\beta} = 0.1.$

利用上述算法求得平衡态时路段流量分别为 $x_1, x_1^*; 20.1748, \hat{x}_1, \hat{x}_1^*; 40.1572, x_2, x_3; 12.2366, \hat{x}_2, \hat{x}_3; 5.4347$, 其中 $q_{13} = 32.4114, \hat{q}_{13} = 45.5919$.

为方便建立交通需求预测组合模型, 该算例路段阻抗函数的选取及设计比较简单. 应用相应的求解算法很容易得到计算结果, 这说明了该模型的有效性和算法的可行性.

参考文献:

- [1] 黄海军. 城市交通网络平衡分析——理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,1994:71-97.
- [2] 陆化普. 交通规划理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2006:220-241.
- [3] 周晶,徐曼. 弹性需求随机用户平衡分配模型及其应用[J]. 系统工程学报,2001,16(2):88-94.
- [4] 罗文昌,袁春华. 弹性需求下的随机用户平衡分配模型及求解算法[J]. 重庆交通学院学报,2003,22(3):101-103.
- [5] 杜进有,罗霞. 城市交通组合随机用户平衡模型[J]. 系统工程理论方法应用,2006,15(5):456-458.
- [6] 罗文昌. 混合交通随机用户平衡分配模型及算法[J]. 宁波大学学报:理工版,2005,18(4):451-457.
- [7] 罗文昌. 混合交通 OD 分布与随机平衡分配模型及算法[J]. 宁波大学学报:理工版,2007,20(4):481-486.
- [8] 周溪召,应伟恒. 城市综合交通规划的组合模型[J]. 同济大学学报,2002,30(7):824-828.
- [9] 四兵锋,钟鸣,高自友. 城市混合交通条件下路段阻抗函数的研究[J]. 交通运输工程与信息,2008,8(1):68-73.
- [10] 黄建中,蔡军. 对我国城市混合交通问题的思考[J]. 城市规划学刊,2006,162(2):87-90.
- [11] 周溪召. 混合交通运量分布与均衡配流组合模型研究[J]. 系统工程学报,2000,15(2):153-157.
- [12] 韦增欣,陈巧萍,陈进来,等. 双向混合交通 OD 分布与均衡配流组合模型及算法[J]. 交通信息与安全,2010,28(3):6-11.
- [13] 袁亚湘,孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京:北京科学出版社,1997.

(责任编辑:尹 闯)