

多方式复合城市交通网络弹性需求 随机用户平衡分配模型*

陈坚¹, 杨飞², 晏启鹏²

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

摘要: 为解决目前交通分配模型仅限于某种方式内, 并缺少考虑方式划分与交通分配相互影响的问题, 描述了多方式复合城市交通网络。网络中涵盖了公交车和小汽车两个子系统, 出行总量满足弹性需求, 并根据两个子系统效用函数进行随机用户平衡分配, 同时子系统内各路段流量分配也满足随机用户平衡, 从而建立了两层次三随机用户平衡的多方式复合城市交通网络弹性需求随机用户平衡分配模型。证明了模型解的等价性及唯一性; 提出了综合对角化算法和 MSA 算法的组合求解算法。最后, 设计了一个算例以验证模型有效性, 计算结果为: 公交车出行量为 814.1 人次/h, 占总出行量 3997.8 人次/h 的 20.36%, 小汽车出行量占 79.64%。表明该模型在计算网络中各路段流量的同时, 也可得出各交通方式的比重。

关键词: 交通规划; 随机用户平衡分配; 多方式复合城市交通网络; 弹性需求; 交通配流

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)10-3693-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.023

Stochastic user equilibrium assignment model of multimodal composite urban transportation network with elastic demand

CHEN Jian¹, YANG Fei², YAN Qi-peng²

(1. School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Transportation & Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To solve the traffic distribution model was limited to some traffic mode inside and lack of consideration influence between traffic mode choice and traffic distribution, this paper described the multimodal composite urban transportation network. Network covered the buses and cars two subsystem. Total travel quantity was met demand elasticity. And according to two subsystem utility function to a stochastic user equilibrium assignment. The traffic flow split of subsystem route also satisfied stochastic user equilibrium assignment, so that it presented the model of two levels and three stochastic user equilibrium assignment of multimodal composite urban transportation network with elastic demand, it proved the equivalent and uniqueness of model. It provided an iterative algorithm based on diagonalization and MSA for the solution of this model. Finally it gave a simple numeral example. The calculation results are: bus travel quantity is 814.1 people/hour, 20.36% of the total amount travel 3997.8 people/hours, the car travel is 79.64%. Results indicates that the model in the calculation of the amount of link network flow rate distribution in the foundation also can draw the proportion of the mode of transportation structure.

Key words: transportation planning; stochastic user equilibrium assignment; multimodal composite urban transportation network; elastic demand; flow split

0 引言

方式划分和交通分配是城市交通需求预测的关键技术,也是交通规划中的重要组成部分。一直以来,二者都是作为两个相对独立的阶段,即在方式划分后,对某种方式内部的各路段再进行流量分配,从而忽略了二者的相互影响和有机联系。已有研究中,方式选择模型是从方式属性、出行者属性及出行属性三个方面建立各方式的效用函数,运用非集计方式计算出行者选择各种方式的概率,如波士顿中央交通规划组运用 MNL 模型分析了居民通勤出行方式选择行为,并重点研究换乘变量

对居民通勤出行方式选择的影响^[1]。Cherchi 等人^[2]基于 RP/SP 调查,建立了意大利 Cagliari 市的居民出行 NL 模型。何明等人^[3]在 RP 和 SP 联合调查的基础上,计算各种方式向轨道交通转移率,建立了应用于轨道交通方式预测的非集计 MNL 模型,并运用于苏州城市轨道交通方式客流量预测实例中。

而交通分配方法始于 1952 年 Wardrop 等人在固定需求及交通网络上任何出行者都能正确掌握道路所有信息的假设下,建立的流量分配用户平衡系统。随后,1977 年由 Daganzo 和 Sheffi 考虑交通行为的随机性,提出了随机用户平衡系统,并统一了随机分配和 Wardrop 平衡的概念^[4-6]。近年来,周晶等

收稿日期: 2012-03-09; 修回日期: 2012-04-20 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908195); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010XS24)

作者简介: 陈坚(1985-),男,江西赣州人,讲师,博士,主要研究方向为交通行为理论与实证、交通运输系统分析与决策(chenjians25@126.com); 杨飞(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为智能交通技术与应用、交通行为理论与实证; 晏启鹏(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为城市交通系统规划。

人^[7]为描述出行者与道路状况的交互作用,研究了弹性需求随机分配模型。刘海旭等人^[8]依据出行者对路网的熟悉程度进行分类,建立了多类型弹性需求随机用户平衡分配模型,得出了对路况更加熟悉的出行者有更多机会选择到最短路径的结论。李学全等人^[9]分析了多种交通方式并存的城市交通网络,基于随机用户平衡理论构造了多模式的交通配流模型。田琼、黄海军等人^[10,11]通过城市公共交通工具内乘客的拥挤成本,建立了城市公交系统内乘客出行动态均衡模型,能够对不同运输能力的公交方式所导致的乘客出行差异进行比较分析。这些研究的交通分配大多局限在单一方式内,而缺少将方式划分与路径选择放入同一网络中考虑,路段阻抗变化对方式选择的反馈影响也尚未涉及。因此,本文所建立的多方式城市交通网络包含两个子系统:公共交通子系统和汽车子网络,网络出行总量满足弹性需求条件,并实现公交出行与小汽车出行方式选择随机用户平衡、公交线网随机用户平衡以及小汽车路网随机用户平衡。

1 多方式城市交通网络描述

多方式的交通网络 $G=(N,A)$, 其中 N 表示网络节点的集合,包括两种类型:a) N_1 为公交站点或轨道交通站点的集合;b) N_2 为城市道路网络节点的集合。 A 表示路段的集合,也包括两种类型:a) A_1 为公交专用线或轨道交通线;b) A_2 为城市道路网络路段的集合。 W 表示网络中起讫点(OD)对集合; w 表示 W 中的元素; R_{wtr} 表示 OD 对 w 之间的所有公交线路集合; R_{wau} 表示 OD 对 w 之间的所有小汽车路径集合; λ_{wtr}^r 表示 OD 对 w 之间公交线路 r 的出行负效用,它由出行时间和票价构成, $r \in R_{wtr}$; λ_{wau}^r 表示 OD 对 w 之间小汽车 r 路径的出行负效用,它等于出行时间与燃油成本之和, $r \in R_{wau}$ 。

1.1 基本假设

a) 网络中出行者可选择公交车(tr)和小汽车(au)两种方式到达目的地,两种方式选择的概率服从 Logit 模型计算公式。

b) 公交车的出行负效用主要包括出行时间(等车时间和行驶时间)和公交票价;小汽车的出行负效用由出行时间和燃油消耗两部分构成。

c) 各公交线路客流分配遵循随机用户平衡,小汽车各路段流量分配也按照随机用户平衡,从而整个网络形成多层次的巢式 Logit 模型。

d) 假设路网中公交线路存在公交专用道,公交车行走时间为定值,对于没有公交专用道的公交线路,其行走时间将受到道路中其他交通方式的影响,本文不考虑此情况。小汽车路段旅行时间函数为路段流量的连续严格单调增函数。

e) 路段和公交车具有能力限制,网络中的流量为出行量人次,且每辆小汽车中乘坐一个人(即一辆小汽车与一个人等价)^[12]。

1.2 符号说明

T_{wtr}^r 表示 OD 对 w 之间公交线路 r 的出行时间(本文为简化问题,设为常数), $\forall w \in W, \forall r \in R_{wtr}$;

p_{wtr}^r 表示 OD 对 w 之间公交线路 r 的票价, $\forall w \in W, \forall r \in R_{wtr}$;

β_1 表示时间折合成标准负效用的换算系数;

β_2 表示票价折合成标准负效用的换算系数;

T_{wau}^r 表示 OD 对 w 之间路径 r 小汽车的行驶时间, $\forall w \in W$,

$\forall r \in R_{wtr}$;

g 表示单位距离小汽车的平均耗油数量;

l_{wtr}^{au} 表示 OD 对 w 之间路径 r 的长度, $\forall w \in W, \forall r \in R_{wtr}$;

α_1 表示小汽车行驶时间转换为标准负效用的换算系数;

α_2 表示小汽车耗油量转换为标准负效用的换算系数;

x_a 表示路段 a 的小汽车流量, $a \in A_2$;

$t_a(x_a)$ 表示路段 a 的小汽车行驶时间函数,可采用 BPR 函数形式计算, $a \in A_2$;

t_a^0 表示路段 a 的自由流行驶时间, $a \in A_2$;

c_a 表示路段 a 的通行能力, $a \in A_2$;

δ_{wtr}^{au} 表示如果路段 a 属于路径 r ,则为 1,否则为 0, $\forall w \in W, \forall r \in R_{wtr}$;

f_{wtr}^r 表示 OD 对 w 之间公交线路 r 客流量, $\forall w \in W, \forall r \in R_{wtr}$;

P_{wtr}^{au} 表示 OD 对 w 之间出行者选择小汽车 k 路径的概率;

θ 表示反映出行者对 w 之间各路径负效用的理解差异;

η 表示反映出行者对 w 之间公交和小汽车两种方式负效用的理解差异;

P_{wtr}^{tr} 表示 OD 对 w 之间出行者选择公交车 k 线路的概率, $\forall w \in W, \forall r \in R_{wtr}$;

q_w^m 表示 OD 对 w 之间选择方式 m 的出行量, $\forall w \in W$;

q_w 表示 OD 对 w 之间的总出行量, $\forall w \in W$;

q_{wmax} 表示 OD 对 w 之间的最大潜在出行量, $\forall w \in W$;

$D_w(\cdot)$ 表示 OD 对 w 之间的出行量需求函数, $D_w^{-1}(\cdot)$ 表示其反函数, $\forall w \in W$ 。

1.3 网络描述

网络结构如图 1 所示。

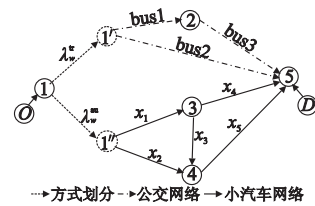


图1 多方式城市交通网络结构

OD 对 w 之间公交线路 r 的出行负效用为^[12]

$$\lambda_{wtr}^{tr} = \beta_1 T_{wtr}^r + \beta_2 p_{wtr}^r \quad \forall w \in W, \forall r \in R_{wtr} \quad (1)$$

OD 对 w 之间使用公交出行的期望最小出行负效用为

$$\lambda_w^{tr} = E \left[\min_{r \in R_{wtr}} \{ \lambda_{wtr}^{tr} \} \right] = - \frac{1}{\theta} \ln \sum_{r \in R_{wtr}} \exp(-\theta \lambda_{wtr}^{tr}) \quad (2)$$

OD 对 w 之间小汽车 r 路径的出行负效用为

$$\lambda_{wtr}^{au} = \alpha_1 T_{wtr}^{au} + \alpha_2 g l_{wtr}^{au} \quad \forall w \in W, \forall r \in R_{wau} \quad (3)$$

小汽车路径行驶时间 T_{wtr}^{au} 可表示为该路径上所有路段的行驶时间之和^[8],即

$$T_{wtr}^{au} = \sum_{a \in A_2} t_a(x_a) \delta_{wtr}^{au} \quad (4)$$

其中: $t_a(x_a) = t_a^0 [1 + 0.15(x_a/c_a)^4]$, $x_a = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_{wau}} f_{wtr}^{au} \delta_{wtr}^{au}$, $l_{wtr}^{au} = \sum_{a \in A_2} l_a^{au} \delta_{wtr}^{au}$ 。

OD 对 w 之间使用小汽车出行的期望最小出行负效用为

$$\lambda_w^{au} = E \left[\min_{r \in R_{wau}} \{ \lambda_{wtr}^{au} \} \right] = - \frac{1}{\theta} \ln \sum_{r \in R_{wau}} \exp(-\theta \lambda_{wtr}^{au}) \quad (5)$$

小汽车交通网络各路径流量分配符合随机用户平衡,即

$$P_{wtr}^{au} = \frac{\exp(-\theta \lambda_{wtr}^{au})}{\sum_{r \in R_{wau}} \exp(-\theta \lambda_{wtr}^{au})} \quad (6)$$

同时,公交车网络各线路的流量分配也满足随机用户平衡,即

$$P_{wk}^{tr} = \frac{\exp(-\theta \lambda_{wk}^{tr})}{\sum_{r \in R_{wtr}} \exp(-\theta \lambda_{wr}^{tr})} \quad (7)$$

小汽车与公交车方式划分满足 Logit 公式,即

$$q_w^m = q_w \frac{\exp(-\eta \lambda_w^m)}{\sum_{n \in \{tr, au\}} \exp(-\eta \lambda_w^n)} \quad (8)$$

OD 对 w 之间期望最小出行负效用为

$$\lambda_w = E \left[\min_{n \in \{tr, au\}} \{ \lambda_w^n \} \right] = -\frac{1}{\eta} \ln \sum_{n \in \{tr, au\}} \exp(-\eta \lambda_w^n) \quad (9)$$

考虑到网络负效用对出行需求的影响,引入如下弹性需求函数^[7]:

$$q_w = D_w(\lambda_w) \leq q_{wmax} \quad \forall w \in W \quad (10)$$

2 模型建立与证明

根据网络描述的分析,建立如下等价多方式弹性需求随机用户平衡的数学规划模型:

$$\begin{aligned} \min U = & \left\{ \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_{wtr}} f_{wr}^{tr} \lambda_{wr}^{tr} + \alpha_1 \sum_{a \in A_2} \int_0^{x_a} t_a(y) dy + \alpha_2 \sum_{a \in A_2} g l_a x_a + \right. \\ & \left. \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{i \in \{tr, au\}} \sum_{r \in R_{wi}} f_{wr}^i (\ln f_{wr}^i - 1) + \frac{1}{\eta} \sum_{w \in W} \sum_{i \in \{tr, au\}} q_w^i (\ln q_w^i - 1) \right\} - \\ & \left\{ \sum_{w \in W} \int_0^{q_w} D_w^{-1}(y) dy + \frac{1}{\eta} \sum_{w \in W} q_w (\ln q_w - 1) \right\} \quad (11) \\ \text{s. t. } & \sum_{i \in \{tr, au\}} q_w^i = q_w \quad (12) \\ & \sum_{r \in R_{wi}} f_{wr}^i = q_w^i \quad (13) \\ & q_w^i \geq 0 \quad (14) \\ & f_{wr}^i \geq 0 \quad (15) \\ & x_a \leq c_a, a \in A_2 \quad (16) \end{aligned}$$

其中: $\forall w \in W, r \in R_{wi}, i \in \{tr, au\}$ 。模型目标函数式(11)没有直观的经济含义;式(12)用来表示 OD 流量的方式划分守恒约束;式(13)表示公交车($i = tr$)或小汽车($i = au$) OD 流量的路径选择守恒约束;式(14)(15)表示两种方式流量、路径流量的非负约束;式(16)为路段流量的能力约束条件。

下面对模型解的等价性和唯一性进行证明,首先构造 Lagrange 函数:

$$L = U + \sum_{w \in W} \lambda'_w (q_w - \sum_{i \in \{tr, au\}} q_w^i) + \sum_{w \in W} \sum_{i \in \{tr, au\}} \lambda_w^i (q_w^i - \sum_{r \in R_{wi}} f_{wr}^i) + \sum_{a \in A_2} \mu_a (x_a - c_a) \quad (17)$$

其中: $\lambda'_w, \lambda_w^i, \mu_a$ 分别为对应约束条件式(12)(13)和(16)的 Lagrange 乘子。

由 KKT 条件可得

$$\frac{\partial L}{\partial q_w^i} = \frac{1}{\eta} \ln q_w^i - \lambda'_w + \lambda_w^i \geq 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_w^i} q_w^i = \left(\frac{1}{\eta} \ln q_w^i - \lambda'_w + \lambda_w^i \right) q_w^i = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_w} = -D_w^{-1} - \frac{1}{\eta} \ln q_w + \lambda'_w \geq 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_w} q_w = \left(-D_w^{-1} - \frac{1}{\eta} \ln q_w + \lambda'_w \right) q_w = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial f_{wr}^{tr}} = \lambda_{wr}^{tr} + \frac{1}{\theta} \ln f_{wr}^{tr} - \lambda_w^{tr} \geq 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial f_{wr}^{tr}} f_{wr}^{tr} = \left(\lambda_{wr}^{tr} + \frac{1}{\theta} \ln f_{wr}^{tr} - \lambda_w^{tr} \right) f_{wr}^{tr} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial L}{\partial f_{wr}^{au}} = \alpha_1 T_{wr}^{au} + \alpha_2 g l_a \delta_{wr}^{au} + \frac{1}{\theta} \ln f_{wr}^{au} - \lambda_w^{tr} \geq 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial f_{wr}^{au}} f_{wr}^{au} = \left(\alpha_1 T_{wr}^{au} + \alpha_2 g l_a \delta_{wr}^{au} + \frac{1}{\theta} \ln f_{wr}^{au} - \lambda_w^{tr} \right) f_{wr}^{au} = 0 \quad (25)$$

根据式(4)中 $T_{wr}^{au} = \sum_{a \in A_2} l_a^{au} \delta_{wr}^{au}$, 并结合式(24)(25)可得到式(26):

$$\alpha_1 T_{wr}^{au} + \alpha_2 g l_a \delta_{wr}^{au} + \frac{1}{\theta} \ln f_{wr}^{au} - \lambda_w^{tr} = 0 \quad (26)$$

根据式(3)(26)可最终变换为式(27):

$$\lambda_w^{au} + \frac{1}{\theta} \ln f_{wr}^{au} - \lambda_w^{tr} = 0 \quad (27)$$

由式(27)可得

$$f_{wr}^{au} = \exp[\theta(\lambda_w^{au} - \lambda_w^{tr})] \quad r \in R_{wau} \quad (28)$$

根据式(13)可得

$$q_w^{au} = \sum_{r \in R_{wau}} f_{wr}^{au} = \sum_{r \in R_{wau}} \exp[\theta(\lambda_w^{au} - \lambda_w^{tr})] \quad (29)$$

$$\text{则 } f_{wk}^{au} = q_w^{au} \frac{\exp(\theta \lambda_w^{au}) \exp(-\theta \lambda_{wk}^{au})}{\sum_{r \in R_{wau}} \exp(\theta \lambda_w^{au}) \exp(-\theta \lambda_{wr}^{au})} =$$

$$q_w^{au} \frac{\exp(\theta \lambda_w^{au}) \exp(-\theta \lambda_{wk}^{au})}{\exp(\theta \lambda_w^{au}) \sum_{r \in R_{wau}} \exp(-\theta \lambda_{wr}^{au})} \quad (30)$$

$$\text{即 } f_{wk}^{au} = q_w^{au} \frac{\exp(-\theta \lambda_{wk}^{au})}{\sum_{r \in R_{wau}} \exp(-\theta \lambda_{wr}^{au})} \quad (31)$$

模型最优解满足小汽车交通网内部随机用户平衡条件式(6)。

同时可得

$$\lambda_w^{au} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_{r \in R_{wau}} \exp(-\theta \lambda_{wr}^{au}) \quad (32)$$

同理根据式(22)(23)可推导出

$$f_{wk}^{tr} = q_w^{tr} \frac{\exp(-\theta \lambda_{wk}^{tr})}{\sum_{r \in R_{wtr}} \exp(-\theta \lambda_{wr}^{tr})} \quad (33)$$

$$\lambda_w^{tr} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_{r \in R_{wtr}} \exp(-\theta \lambda_{wr}^{tr}) \quad (34)$$

即可证明模型最优解满足公交网络内随机用户平衡条件式(7)。

根据式(18)(19)可得

$$\frac{1}{\eta} \ln q_w^i - \lambda'_w + \lambda_w^i = 0 \quad (35)$$

$$q_w^i = \exp[\eta(\lambda'_w - \lambda_w^i)] \quad (36)$$

$$q_w = \sum_{i \in \{tr, au\}} q_w^i = \sum_{i \in \{tr, au\}} \exp[\eta(\lambda'_w - \lambda_w^i)] \quad (37)$$

$$\text{则 } q_w^j = q_w \frac{\exp(\eta \lambda'_w) \exp(-\eta \lambda_w^j)}{\sum_{i \in \{tr, au\}} \exp(\eta \lambda'_w) \exp(-\eta \lambda_w^i)} =$$

$$q_w \frac{\exp(\eta \lambda'_w) \exp(-\eta \lambda_w^j)}{\exp(\eta \lambda'_w) \sum_{i \in \{tr, au\}} \exp(-\eta \lambda_w^i)} \quad (38)$$

$$\text{即 } q_w^j = q_w \frac{\exp(-\eta \lambda_w^j)}{\sum_{i \in \{tr, au\}} \exp(-\eta \lambda_w^i)} \quad (39)$$

可证明模型最优解满足 Logit 方式划分条件式(8)。

再根据式(35)可得

$$\exp(\eta \lambda'_w) = \frac{q_w}{\sum_{i \in \{tr, au\}} \exp(-\eta \lambda_w^i)} \quad (40)$$

$$\text{即 } \lambda'_w = \frac{1}{\eta} \ln q_w - \frac{1}{\eta} \ln \sum_{i \in \{tr, au\}} \exp(-\eta \lambda_w^i) \quad (41)$$

根据式(20)(21)可得

$$-D_w^{-1} - \frac{1}{\eta} \ln q_w + \lambda'_w = 0 \quad (42)$$

将式(41)代入(42)可得

$$\lambda_w = D_w^{-1} = -\frac{1}{\eta} \ln \sum_{i \in \{tr, au\}} \exp(-\eta \lambda_w^i) \quad (43)$$

即模型最优解也满足弹性需求函数式(9)(10)。

最后,根据非线性规划理论知识,该模型目标函数为凸函数,约束条件为线性等式,故模型具有唯一解。

3 求解算法

采用对角化算法和MSA组合算法对模型求解^[8],具体步骤如下:

a) 初始化。在路段自由走行时间 $\{t_a(0)\}$ 和 l_a^{au} 的基础上,计算 $\lambda_w^{(0)}, \forall w \in W$;根据初始公交票价 $p_{ur}^{(0)}$,和公交线路运行时间 T_{ur}^0 计算 $\lambda_w^r, \forall w \in W$;由式(9)计算 $\lambda_w, \forall w \in W$ 。运用出行量需求函数式(10)可计算相应的出行总量 $q_w^{(0)}, \forall w \in W$ 。

b) 随机分配。依次对 $q_w^{(0)}, \forall w \in W$ 进行出行方式随机分配,得到一组初始可行方式流量 $\{q_w^{au(k)}, q_w^{tr(k)}\}$ 。在此基础上,进行小汽车网络内部和公交网络内部路径随机分配,得到一组初始可行路段和公交线路流量 $\{x_a^{(k)}, f_{ur}^{(k)}\}, \forall w \in W, \forall a \in A_2, \forall r \in R_{wtr}$ 。使 $k=1$ 。

c) 更新。令 $t_a^{(k)} = t_a(x_a^{(k)}), \forall a \in A_2$ 。

d) 确定下降方向。在当前路段走行时间 $\{t_a^{(k)}\}$ 的基础上,计算 $\lambda_w^{(k)}, \forall w \in W$;由于公交线路票价 $p_{ur}^{(0)}$ 不变,故 λ_w^r 不变, $\forall w \in W$;计算新的 $\lambda_w^{(k)}, \forall w \in W$,更新出行总量 $q_w^{(k)}, \forall w \in W$ 。依次进行出行方式随机分配和各方面内部路径随机分配,得到一组辅助路段和公交线路流量 $\{v_a^{(k)}\}, \forall a \in A_2$ 。

e) 更新流量。运用已设好的步长 $\phi^{(k)} = \frac{1}{k}$,得到新的路段流量为

$$x_a^{(k+1)} = x_a^{(k)} + \phi^{(k)} (v_a^{(k)} - x_a^{(k)}) \quad \forall a \in A_2 \quad (44)$$

f) 收敛标准。运用以下收敛条件作为循环结束依据:

$$\left| \frac{\lambda_w^{(k+1)} - \lambda_w^{(k)}}{\lambda_w^{(k)}} \right| < \varepsilon \quad \forall w \in W \quad (45)$$

其中: ε 为预设误差。当满足收敛条件循环结束;否则,令 $k=k+1$,返回c)。

4 算例

算例网络如图2所示,包括6个节点(2个虚拟节点),8条路段(2条虚拟路段)和一个OD对 $w(1 \rightarrow 6)$,两条虚线(1,2)、(1,3)代表方式划分虚拟路段,点画线(2,6)代表公交线路,实线则为小汽车行驶路段。

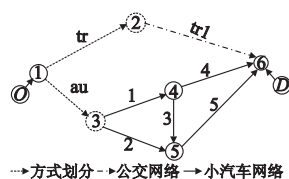


图2 算例网络

小汽车路段的走行时间函数采用BPR函数,即 $t_a(x_a) = t_a^0 [1 + 0.15(x_a/c_a)^4]$,路段自由走行时间和通行能力如表1所示,小汽车每km油耗 g 为0.075 L,费用转换时间的折算系数为0.2。公交线路tr1(2,6)的运行时间为1.3 h,由于城市公交票价主要采用一票制,设定票价为1元/人次,公交车费用转换时间的折算系数为0.3。出行者路径熟悉程度参数 θ 为2.0,方式划分参数 η 为1.3。OD对 w 之间最大潜在出行量为

4 000 人次/h^[8]。出行量需求函数假设为线性形式,即 $q_w = q_{wmax} - 6.0\lambda_w$ 。

表1 路段自由走行时间和通行能力

参数	路段编号				
	1	2	3	4	5
l_a^{au}/km	12	16	4	9	6
T_{ur}^0/h	0.30	0.40	0.10	0.30	0.15
$c_a/(\text{veh} \times \text{h}^{-1})$	1600	1600	1800	1600	1200

根据模型求解算法,结果如表2所示。同时可以得出:多方式城市交通网络中,公交车出行量为814.1人次/h,占总出行量3997.8人次/h的20.36%,小汽车出行量占79.64%。由此可以看出,该模型既可计算网络中各路段流量分配结果,也可得出各交通方式的结构比例。

表2 平衡时流量分配结果

参数	tr	au	路段编号					tr1
			1	2	3	4	5	
t_a/h	1.60	0.55	0.60	0.65	0.16	0.45	0.42	1.6
$x_a/(\text{人次} \times \text{h}^{-1})$	814.1	3183.7	2064.0	1119.5	896.2	1167.8	2015.7	814.1

5 结束语

本文建立了多方式复合城市交通网络弹性需求随机用户平衡分配模型,将方式分配与路径选择同时在网络中描述,并通过模型反映出行者在实际多方式多路径网络中的选择行为,是对现有交通模型的完善与补充。需要指出的是虽然本文城市交通网络中仅考虑了公交与小汽车两种方式,但实际应用中也可根据研究问题的需要将网络中的方式类型进行扩展。同时,算法在大规模网络中的有效性有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Central Transportation Planning. Transfer penalties in urban mode choice modeling[M]. Washington DC: US Department of Transportation; US Environmental Protection Agency, 1997:30-45.
- [2] CHERCHI E, De dios ORTÚZARJ. Mixed RP/SP models incorporating interaction effects[J]. Transportation, 2002, 29(4):371-395.
- [3] 何明, 过秀成, 冉江宇, 等. 基于非集计MNL模型的轨道交通方式预测[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(2):136-141.
- [4] SHEFFI Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [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] HUANG Hai-jun, TIAN Qiong, YANG Hai, et al. Modal split and commuting pattern on a bottleneck-constrained highway[J]. Transportation Research Part E: Logistics, 2007, 43(5):578-590.
- [7] 周晶, 徐晏. 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):88-84.
- [8] 刘海旭, 蒲云. 多类型弹性需求随机用户平衡分配模型[J]. 系统工程理论方法应用, 2005, 14(2):159-163.
- [9] 李学全, 刘美娇. 多模式城市交通网络随机用户平衡配流模型[J]. 数学理论与应用, 2007, 27(2):101-104.
- [10] 田琼, 黄海军. 城市公交系统中乘客出行动态均衡模型[J]. 管理科学学报, 2009, 12(1):1-8.
- [11] 黄海军, 田琼, 杨海, 等. 高峰期公交车乘车均衡模型与竞争分析[J]. 管理科学学报, 2005, 8(6):1-9.
- [12] 史若燃, 李志纯. 不同市场机制下多种交通方式定价模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5):91-97.