

# 随机用户均衡准动态交通分配模型

赵传林, 齐琪, 贺少松, 孙阳琪

(北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 102616)

**摘要:** 动态交通分配问题是交通科学研究的热点和难点, 将动态交通分配方法应用于大规模网络往往产生过高的计算成本。通过研究准动态交通分配问题, 降低动态交通分配中时间的连续性和动态交通分配模型的复杂性。采用路段行程时间计算公式定义一种新的剩余交通需求计算方法; 然后考虑剩余交通需求在时段之间的传播过程和出行者对路网的熟悉程度差异, 建立基于 Logit 的随机用户均衡准动态交通分配模型, 基于逐次平均法设计模型的求解算法。最后通过 Braess 网络和九节点网络说明模型的应用情况, 并分析模型参数的敏感度, 验证模型的合理性与算法的有效性。本研究丰富了交通科学基础理论, 为交通政策的制定提供参考依据。

**关键词:** 城市交通; 准动态交通分配; 随机用户均衡; 剩余交通需求; 路段行程时间

中图分类号: F407.47; U491

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2024)01-0104-08

## A Quasi-dynamic Traffic Assignment Model with Stochastic User Equilibrium

ZHAO Chuanlin, QI Qi, HE Shaosong, SUN Yangqi

(School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

**Abstract:** Dynamic traffic assignment is a hot topic and difficult issue in the transportation research field, where the application of dynamic traffic assignment methods to large-scale networks often results in high computation costs. By studying the quasi-dynamic traffic assignment problem, the time continuity of dynamic traffic assignment and the complexity of corresponding models can be reduced. A new calculation method of residual traffic demand is defined based on link travel time. Then, considering the propagation of residual traffic demand between time periods and the differences in the familiarity of travelers with the road network, a Logit-based quasi-dynamic traffic assignment model with stochastic user equilibrium is established. An algorithm is designed to solve the model based on the successive average method. Finally, the application of the model is conducted on a Braess network and a nine-node network. The sensitivity analysis of model parameters is carried out to verify the effectiveness of the model and the algorithm. Results enrich the basic theory of the transportation research field and can provide references for transportation policymakers.

**Key words:** urban traffic; quasi-dynamic traffic assignment; stochastic user equilibrium; residual traffic demand; link travel time

交通分配是交通规划中的一个重要步骤, 是指按照某种路径选择机制将起讫点 (origin destination, OD) 对之间的交通量分配到路网中各条路径上。主要的路径选择机制包括用户均衡、动态用户均衡和随机用户均衡。1952 年, Wardrop<sup>[1]</sup> 提出静态用户均衡 (user equilibrium, UE) 的定义。考虑时间

因素, Friesz 等<sup>[2]</sup> 建立动态用户均衡 (dynamic user equilibrium, DUE) 模型。考虑出行者的感知误差, Daganzo 等<sup>[3]</sup> 建立随机用户均衡 (stochastic user equilibrium, SUE) 模型。

静态交通分配模型在交通规划中应用广泛, 但无法表示网络中流量的动态变化过程。动态交通分

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71971014); 北京市教委科技计划资助项目 (KM202010016007); 北京建筑大学金字塔人才培养工程资助项目 (JDJQ20200301); 北京建筑大学研究生创新资助项目 (PG2023051, PG2023052)

作者简介: 赵传林 (1987—), 男, 山东省人, 副教授, 博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理。

配的结果虽然更加真实, 但模型复杂且计算成本较高<sup>[4-5]</sup>。为平衡静态与动态交通分配的不足之处, 相关研究聚焦准动态交通分配问题。Lam 等<sup>[6]</sup>考虑时变的而非静态的 OD 需求, 提出一种时变的点排队准动态交通分配模型, 模型中路段时间函数采用传统的静态 BPR 函数, 避开排队过程满足先进先出 (first-in-first-out, FIFO) 的难题。Smith 等<sup>[7]</sup>提出一个具有明确路段出口能力、排队延迟及排队存储能力界限的准动态交通分配模型, 并证明该模型对任何可行的需求都有均衡解。Bilemer 等<sup>[8]</sup>建立一种考虑容量约束的准动态交通分配模型, 模型采用一阶节点模型<sup>[9]</sup>的方法以保证点排队位置在瓶颈节点之前, 并证明模型在大规模网络上应用的可行性。Tajtehranifard 等<sup>[10]</sup>结合一阶节点模型开发一种新的求解系统最优准动态交通分配模型的路径边际成本逼近算法, 并应用于大规模网络。Nakayama 等<sup>[11]</sup>建立一类离散时间的准动态交通分配模型, 考虑时段间的流量传播过程, 证明模型解的存在性与唯一性。Chan 等<sup>[12]</sup>设计了准动态交通分配模型的并行式求解算法, 借助于高性能计算机将模型应用于大规模交通网络的求解。

上述研究在用户均衡框架下展开, 而且通常采用 BPR (bureau of public road) 函数和一阶节点模型计算的准动态行程时间并不能够同时满足动态交通分配的 6 个要求 (即与排队理论计算结果的兼容性、路径时间为各路段时之和、路段时间能够基于瞬时流量演化过程、路段时间对于路段需求和流量求导的一致性、先进先出以及新增加节点不会影响路径时间的计算)。Van der Gun 等<sup>[13]</sup>定义一种新的准动态交通分配模型中行程时间的计算方法, 验证了通过该方法计算的行程时间能够同时满足动态交通分配的 6 个要求。

本文的创新点在于采用新的路段行程时间计算公式<sup>[13]</sup>, 考虑出行者的感知误差, 进而建立随机用户均衡准动态交通分配模型。首先给出路段和路径行程时间公式, 定义一种新的剩余交通需求的计算方法, 考虑剩余交通需求在时段间的传播过程, 建立模型; 然后基于相继平均法 (method of successive averages, MSA) 方法设计模型的求解算法; 最后在 Braess 网络<sup>[14]</sup>和九节点网络<sup>[15]</sup>对模型与算法的有效性进行验证。

## 1 建立模型

假设研究时段为  $[0, T]$ , 研究时段内的时间步长为常数  $t$ ,  $k$  表示研究时段中第  $k$  个时间步数, 总时间步数为  $K$ 。例如, 假设研究时段  $T$  为 60 min, 时间步长  $t$  为 5 min, 则总时间步数  $K$  为 12。

给定一个有向交通网络  $G = (N, A)$ 。其中,  $N$  为节点集合;  $A$  为路段集合。

模型中其他参数设置见表 1。

表 1 模型中参数设置  
Table 1 Parameter settings

参数	定义
$a$	每个路段, $a \in A$
$V_a$	路段 $a$ 的物理 (非零) 容量
$x_{a,k}$	在第 $k$ 个时间步数内路段 $a$ 上的交通量
$R$	起点的集合, $R \in N$
$N$	终点的集合, $S \in N$
$(r, s)$	起讫点 (OD) 对, $r \in R, s \in S$
$L^{rs}$	从起点 $r$ 到终点 $s$ 的所有路径的集合
$h_k^{rs}$	OD 对 $(r, s)$ 在第 $k$ 个时间步数内的初始交通需求
$f_{l,k}^{rs}$	OD 对 $(r, s)$ 在第 $k$ 个时间步数内路径 $l$ 的初始交通需求
$g_{l,k}^{rs}$	在第 $k$ 个时间步数内路径 $l$ 的剩余交通需求
$h_{l,k,z}^{rs}$	OD 对 $(r, s)$ 在第 $k$ 个时间步数内路径 $l$ 的实际交通需求

### 1.1 路段和路径行程时间

在每个时间步长内, 令  $u_a(x_{a,k})$  表示在第  $k$  个时间步数内路段  $a$  的行程时间函数,  $u_a^f$  表示自由流时间,  $u_a^{\text{queue}}$  表示排队延误时间, 得到式 (1) ~ (2)。

$$u_a(x_{a,k}) = u_a^f + u_a^{\text{queue}}; \quad (1)$$

$$u_a^{\text{queue}} = \frac{x_{a,k} t}{2V_a} \left( \frac{1}{\alpha_a} - 1 \right). \quad (2)$$

式 (2) 可以同时满足动态交通分配的六项要求, 其推导过程见文献 [13]。式中,  $\alpha_a$  为路段折减系数, 计算公式为

$$\alpha_a = \min \left( 1, \frac{V_a}{x_{a,k}} \right). \quad (3)$$

路段折减系数考虑到路段流入流量与路段容量的关系, 对下游路段的流入流量进行限制, 并且可以确定由于下游路段容量不足进而在上游路段形成

的队列位置。当  $\alpha_a = 1$  时, 表示路段  $a$  中没有产生排队, 不会对下游流入路段的流入流量造成影响; 当  $\alpha_a < 1$  时, 表示路段  $a$  中产生排队并且影响下游流入路段的流入流量。

将式 (2)、(3) 代入式 (1) 中, 得到

$$u_a(x_{a,k}) = \begin{cases} u_a^{\text{ff}}, & V_a > x_{a,k}; \\ u_a^{\text{ff}} + \frac{x_{a,k} t}{2V_a} \left( \frac{x_{a,k}}{V_a} - 1 \right), & V_a \leq x_{a,k}. \end{cases} \quad (4)$$

由式 (4) 可以看出路段行程时间只与本路段的流量  $x_{a,k}$  有关, 并且关于  $x_{a,k}$  连续。进而得到 OD 对  $(r, s)$  在第  $k$  个时间步数内路径  $l$  的行程时间  $c_{l,k}^{rs}(x_{a,k})$ , 见式 (5)。

$$c_{l,k}^{rs}(x_{a,k}) = \sum_{a \in A} u_a(x_{a,k}) \delta_{a,l}^{rs}, \quad l \in L^{rs}. \quad (5)$$

其中,  $\delta_{a,l}^{rs}$  为描述路径与路段关系的 0-1 变量。如果路段  $a$  在连接 OD 对  $(r, s)$  的路径  $l$  上,  $\delta_{a,l}^{rs} = 1$ , 否则,  $\delta_{a,l}^{rs} = 0$ 。对于每个时间步长内, 因为路径行程时间是路径上所有路段的路段行程时间的总和, 所以路径行程时间  $c_{l,k}^{rs}(x_{a,k})$  也是连续的。

### 1.2 剩余交通需求

当某个时间步长某条路径分配的交通需求较大时, 通过式 (5) 计算的路径行程时间大于时间步长, 即部分交通需求在当前时间步长内无法到达终点。将时间步长内路径上无法到达终点的这部分需求定义为剩余交通需求。

定义一种新的剩余交通需求函数  $g_{l,k}^{rs}$ , 表示在第  $k$  个时间步数内路径  $l$  的剩余交通需求, 如式 (6) 所示, 即按比例分配, 通过比例计算得到剩余交通需求的具体数值。

$$g_{l,k}^{rs} = \begin{cases} \frac{h_{l,k,z}^{rs}}{c_{l,k}^{rs}(x_{a,k})} (c_{l,k}^{rs}(x_{a,k}) - t), & c_{l,k}^{rs}(x_{a,k}) > t; \\ 0, & c_{l,k}^{rs}(x_{a,k}) \leq t. \end{cases} \quad (6)$$

### 1.3 时间步数间流量传播过程

考虑时间步数之间的流量传播过程, 即对于上一个时间步数中出现的剩余交通需求需要更新到下一个时间步数实际交通需求的计算。因此, 每个时间步数中各路径的实际交通需求  $h_{l,k,z}^{rs}$  由两部分构成: 一部分为该时间步长内的初始交通需求; 另一部分为上一时间步长的剩余交通需求。

$$h_{l,k,z}^{rs} = f_{l,k}^{rs} + g_{l,k-1}^{rs}. \quad (7)$$

由于剩余交通需求在上一个时间步长中已经做出路径选择, 因此在下一个时间步长中剩余交通需求不会重新进行路径选择, 依旧保持上一时间步长的选择结果。因此, 路段交通流量  $x_{a,k}$  的计算公式为

$$x_{a,k} = h_{l,k,z}^{rs} \delta_{a,l}^{rs}, \quad l \in L^{rs}. \quad (8)$$

### 1.4 随机用户均衡模型

在每个时间步长内, 采用 Logit 模型进行路径流量分配, 那么路径  $l$  被选择的概率为

$$P_{l,k}^{rs} = \frac{\exp(-\theta c_{l,k}^{rs})}{\sum_{j \in L^{rs}} \exp(-\theta c_{j,k}^{rs})}. \quad (9)$$

其中,  $\theta$  为反映人们对路网阻抗熟悉程度的变量。

## 2 求解算法

基于逐次平均法设计模型的求解算法, 每个时间步数内, 流量分配采用 MSA 算法求解。考虑时间步数间流量的传播过程, 算法流程如图 1 所示。

**步骤 1** 初始化各路段路径阻抗, 设置最大迭代次数、收敛精度, 令  $I = 1$ 。

**步骤 2** 开始迭代, 利用 MSA 算法求解。

1) 设置时间步数  $k = 1$ 。

2) 更新路段、路径流量, 并根据式 (3) 计算折减系数  $\alpha_a$ 。

3) 行程时间计算。根据式 (4) 计算路段行程时间  $u_a(x_{a,k})$ , 根据式 (5) 计算路径行程时间  $c_{l,k}^{rs}(x_{a,k})$ 。

4) 剩余交通需求计算。根据式 (6) 计算剩余交通需求  $g_{l,k}^{rs}$ 。若不存在剩余交通需求, 则转至 6)。

5) 更新 OD 需求  $h_{l,k,z}^{rs}$ 。根据式 (7) 更新下一时间步长 OD 需求。

6) 计算迭代下降方向。根据搜索方向  $(y'_{a,k} - x'_{a,k})$ , 计算路段流量  $x'_{a,k+1} = x'_{a,k} + \frac{1}{I} (y'_{a,k} - x'_{a,k})$ 。

7) 时间步数检验。若满足条件则进行步骤 3; 若不满足, 则返回 2)。

**步骤 3** 收敛检验。若  $\max |p_i^{rs} - p_i^{rs}| < \rho$ , 则满足收敛条件, 输出各路段折减系数、各路径流量; 若不满足收敛精度, 则返回步骤 2)。

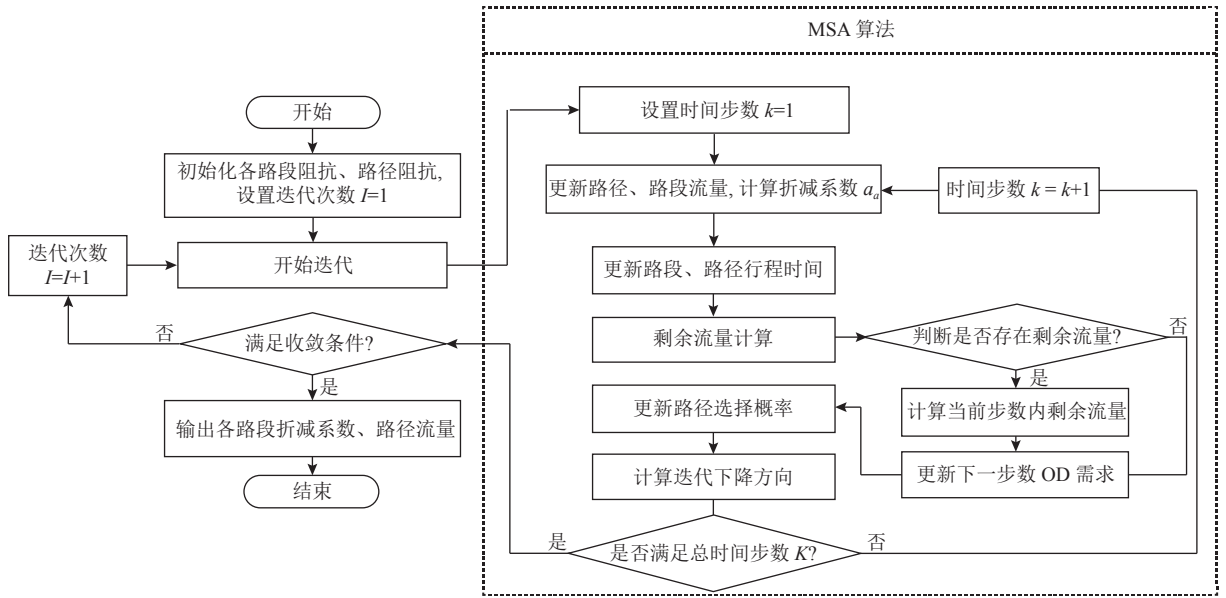


图 1 算法流程图

Figure 1 The flow chart of the algorithm

### 3 数值算例

本节选取单 OD 对的两个不同网络分别验证模型的可行性, 其中, 较为简单的网络为交通网络中经典的 Braess 网络。为提升路网复杂度, 同时选取九节点网络进行算例验证。

#### 3.1 算例 1

##### 3.1.1 算例描述

算例 1 采用 Braess 路网, 该路网包括 4 个节点、5 条路段和 1 个 OD 对, 见图 2。各路段参数设置和路网中的有效路径分别见表 2 和表 3。研究时段为  $T = 120 \text{ min}$ ,  $t = 15 \text{ min}$ ,  $K = 8$ , 研究时段中各时间步数的初始交通需求见表 4。MSA 算法中最大迭代次数设置为 5 000 次,  $\theta = 0.1$ , 迭代精度  $\rho = 0.001$ 。

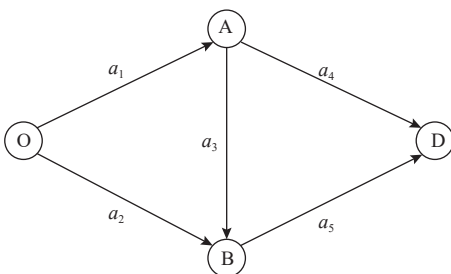


图 2 Braess 路网

Figure 2 A Braess network

表 2 各路段参数

Table 2 Parameters of links

路段	路段编号	自由流时间/min	路段容量/(辆 · min <sup>-1</sup> )
O→A	$a_1$	6	60
O→B	$a_2$	12	80
A→B	$a_3$	6	67
A→D	$a_4$	8	73
B→D	$a_5$	2	60

表 3 路网中的有效路径

Table 3 Effective routes in the road network

路径	路径编号	自由流时间/min
O→B→D	1	14
O→A→D	2	14
O→A→B→D	3	14

表 4 各时间步数的初始交通需求

Table 4 Initial traffic demand for each time step

时间步数	1	2	3	4	5	6	7	8
交通需求/(辆 · 15 min <sup>-1</sup> )	1 300	1 400	1 500	1 550	1 600	1 500	1 400	1 200

##### 3.1.2 结果分析

图 3 显示了算法的收敛性能。在迭代开始时 gap 值快速下降, 在经过约 1 200 次迭代后, gap 值下降速度减慢并逐渐趋于稳定; 经过约 4 300 次迭



表 8 表示当 OD 对初始需求为 1 600 时,  $\theta$  值变化时各路径流量的分配结果及选择概率。可以看出, 当  $\theta = 0.1$  时, 出行者对路网熟悉程度较低, 3 条路径上的均衡流量差距不大, 近似于平均分

配。随着  $\theta$  的增加, 3 条路径上的流量差距变大。当  $\theta = 2$  时, 路径 3 上的均衡流量最低, 较多的流量分配在路径 1 与路径 2。这是由于随着  $\theta$  值的增加, 出行者对各路径的实际出行成本更加熟悉。

表 7 路径剩余交通需求

Table 7 Residual traffic demand of routes

路径	I = 1								I = 2							
	K = 1	K = 2	K = 3	K = 4	K = 5	K = 6	K = 7	K = 8	K = 1	K = 2	K = 3	K = 4	K = 5	K = 6	K = 7	K = 8
1	0	0	0	19.23	56.85	72.63	64.01	5.50	0	0	0	6.09	23.96	11.64	0	0
2	0	0	0	19.23	56.85	72.63	64.01	5.50	0	0	0	6.09	23.96	11.64	0	0
3	0	0	27.12	68.45	137.46	171.05	160.37	46.58	0	0	16.31	39.37	63.43	44.99	0	0

表 8 流量分配结果

Table 8 Flow assignment results

$\theta$ 值	各路径流量/(辆·15 min <sup>-1</sup> )			各路径选择概率		
	路径 1	路径 2	路径 3	路径 1	路径 2	路径 3
0.1	557.91	557.91	484.19	0.35	0.35	0.30
0.5	605.19	605.19	389.63	0.38	0.38	0.24
0.7	618.01	618.01	363.98	0.39	0.39	0.22
1	630.98	630.98	338.05	0.39	0.39	0.21
2	653.97	653.97	292.06	0.41	0.41	0.18

### 3.2 算例 2

#### 3.2.1 算例描述

算例 2 采用如图 5 所示的有向路网, 包含 9 个节点、12 条路段和 1 个 OD 对。路段参数和路网中的有效路径分别如表 9 和表 10 所示。研究时段为  $T = 120 \text{ min}$ ,  $t = 12 \text{ min}$ ,  $K = 10$ , 研究时段中各个时间步数的初始交通需求见表 11。MSA 算法中最大迭代次数设置为 5 000 次,  $\theta = 0.1$ , 迭代精度  $\rho = 0.001$ 。

#### 3.2.2 结果分析

图 6 给出算法的收敛性能。经过约 3 400 次迭

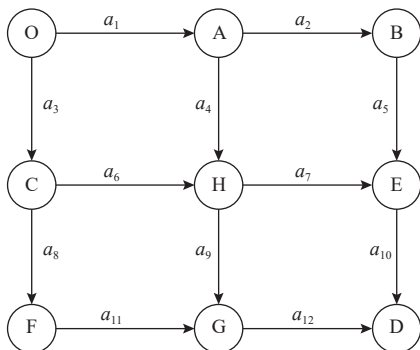


图 5 有向路网

Figure 5 A directional road network

代后, gap 值小于 0.001, 达到收敛要求。

表 12 给出 12 条路段在前 2 次迭代中各路段的折减系数。在第 1 次迭代中, 路段 OC 的折减系数随着时段和交通需求的变化持续降低, 这说明路段

表 9 各路段参数

Table 9 Parameters of links

路段	路段编号	自由流时间/min	路段容量/(辆·min <sup>-1</sup> )
O→A	$a_1$	3	7
A→B	$a_2$	2	5
O→C	$a_3$	3	4
A→H	$a_4$	1	4
B→E	$a_5$	2	4
C→H	$a_6$	2	5
H→E	$a_7$	4	7
C→F	$a_8$	2	4
H→G	$a_9$	1	4
E→D	$a_{10}$	3	5
F→G	$a_{11}$	3	4
G→D	$a_{12}$	2	7

表 10 路网中的有效路径

Table 10 Effective routes in the road network

路径	路径编号	自由流时间/min
O→A→B→E→D	1	10
O→A→H→E→D	2	11
O→A→H→G→D	3	7
O→C→H→G→D	4	8
O→C→F→G→D	5	10
O→C→H→E→D	6	12

表 11 各时间步数初始交通需求

Table 11 Initial traffic demand for each time step

时间步数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
交通需求/(辆·15 min <sup>-1</sup> )	300	400	450	500	600	650	550	450	400	300

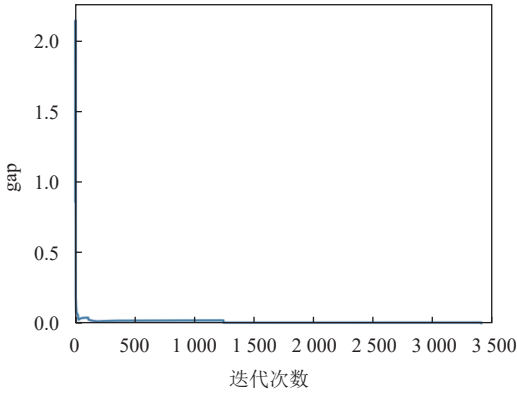


图 6 gap 值变化图

Figure 6 Changes of variable gap

OC 上始终存在排队且排队情况逐渐严重。路段 HG 与路段 ED 在大部分时间步数中也存在排队情况。在第 2 次迭代中出行者的路径选择受到第 1 次迭代的影响，出行者转而选择出行时间更短的路径，因而选择的路径包含路段 OA 的比例增加，路段 OA 上流量增加，使得路段 OA 与路段 AH 上均存在排队情况。

表 13 表示前 2 次迭代中各路径的剩余交通需求

求。在第 1 次迭代时，从第 3 个时间步数开始，各路径上均有不同程度的剩余交通需求。经过第 1 次迭代后，各条路径的被选择概率被重新更新，各路径上的剩余交通需求也随之发生变化。

### 3.2.3 敏感度分析

对算例 2 中参数  $\theta$  进行敏感度分析。其中， $\theta$  取值分别为 0.1、0.5、0.7、1、2。

表 14 表示在第 10 个时间步数 OD 对初始需求为 300 时， $\theta$  值变化时各路径流量的分配结果及选择概率。随着  $\theta$  的增加，6 条路径上的流量差距变大，较多的流量分配给了路径实际出行成本更低的路径。结果表明，随着  $\theta$  值的增加，出行者对路网情况越熟悉。

## 4 结论

本文考虑时间步数之间剩余交通需求的传播过程，建立随机用户均衡准动态交通分配模型，设计了求解算法。以两个路网为例，对模型中参数进行分析，验证模型与算法的有效性，通过分析可得出

表 12 路段折减系数

Table 12 Reduction factors of links

路段	I = 1										I = 2									
	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10
A→B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.98	0.74	0.60
A→H	1	1	1	1	1	0.92	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.69	0.46	0.30	0.23	0.19	0.16
B→E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.89	0.65	0.49	0.40
O→A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.97	0.95	0.97	0.65	0.45	0.34	0.27	0.23
O→C	1	1	0.89	0.78	0.62	0.47	0.38	0.33	0.29	0.27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C→H	1	1	1	1	1	1	0.85	0.73	0.64	0.59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C→F	1	1	1	1	1	1	1	1	0.89	0.84	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H→E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.82	0.70
H→G	1	1	1	1	1	0.84	0.78	0.74	0.68	0.65	1	1	1	0.98	0.79	0.67	0.50	0.39	0.33	0.30
E→D	1	1	1	1	0.95	0.81	0.77	0.77	0.76	0.79	1	1	1	1	1	0.80	0.60	0.44	0.34	0.28
F→G	1	1	1	1	1	1	1	1	0.89	0.84	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G→D	1	1	1	1	1	1	0.93	0.85	0.77	0.73	1	1	1	1	1	1	0.98	0.78	0.66	0.61

表 13 路径剩余交通需求

Table 13 Residual traffic demand of routes

路径	I = 1										I = 2									
	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10
1	0	0	0	0	0	1.60	5.90	4.82	5.65	1.66	0	0	0	0	0	59.33	157.10	261.90	374.70	465.90
2	0	0	0	0	0	14.55	13.92	11.37	11.29	6.27	0	0	0	0	27.75	119.90	236.60	348.70	462.20	553.00
3	0	0	0	0	0	0	0	0.37	12.90	18.23	0	0	0	0	28.77	175.80	342.50	472.20	569.60	623.60
4	0	0	0	0	21.42	73.07	120.30	158.5	194.00	215.60	0	0	0	0	0	3.92	5.27	4.24	3.24	2.90
5	0	0	0	4.53	31.88	79.69	122.90	157.3	189.50	208.30	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.07	0.06
6	0	0	6.04	16.36	45.51	96.01	140.90	176.5	208.70	227.00	0	0	0.95	1.66	0	3.84	3.60	2.84	2.29	2.17

表 14 流量分配结果

Table 14 Flow assignment results

$\theta$ 值	各路径流量/(辆·15min <sup>-1</sup> )						各路径选择概率					
	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5	路径 6	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5	路径 6
0.1	47.68	43.14	64.32	58.16	47.70	38.99	0.16	0.14	0.21	0.19	0.16	0.13
0.5	31.72	19.24	128.02	77.56	31.67	11.79	0.11	0.06	0.43	0.26	0.11	0.04
0.7	29.84	14.82	145.74	72.24	29.76	7.60	0.10	0.05	0.49	0.24	0.10	0.02
1.0	28.43	10.46	167.26	61.45	28.34	4.07	0.09	0.03	0.56	0.21	0.09	0.01
2.0	28.04	2.67	201.89	38.78	27.99	0.63	0.09	0.01	0.68	0.13	0.09	0.00

以下结论。

1) 在时间步数之间考虑剩余交通需求的传播过程, 当路径中某一路段存在剩余需求时, 会对下一时段路径的出行时间造成影响。

2) Logit 模型中  $\theta$  值会影响路径选择概率。随着  $\theta$  值的增加, 出行者对各路径的实际出行成本更加熟悉, 选择出行成本低的路径的概率增加。

3) 基于两个路网进行数值分析, 验证文中随机用户均衡准动态交通分配模型与算法的有效性。

本研究丰富了交通科学基础理论, 可以为交通规划、交通需求预测等提供理论依据。然而, 本文只考虑点排队, 并没有考虑水平排队的现象; 另一方面, 文中采用传统的 Logit 模型, 而模型中存在的 II A 特性会对交通分配结果产生影响。因此, 在下一步的研究中将考虑采用 PSL (path-size logit) 模型或 C-logit 模型来解决路径重叠问题, 还将同时考虑出行路径和出发时间选择问题, 以期将准动态交通分配方法应用于大规模网络。

#### 参考文献:

- [1] WARDROP J G. Some theoretical aspects of road traffic research[J]. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 1952, 1(2): 325-378.
  - [2] FRIESZ T L, BERNSTEIN D, SUO Z, et al. Dynamic network user equilibrium with state-dependent time lags[J/OL]. Networks and Spatial Economics, 2001, 1: 319-347. (2001-09). <https://doi.org/10.1023/A:1012896228490>.
  - [3] DAGANZO C F, SHEFFI Y. On stochastic models of traffic assignment[J]. Transportation Science, 1997, 11(3): 253-274.
  - [4] 高自友, 任华玲. 城市动态交通流分配模型与算法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
  - [5] 龙建成, 郭嘉琪. 动态交通分配问题研究回顾与展望 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 125-138.
- LONG Jiancheng, GUO Jiaqi. Review and prospect of dynamic traffic assignment research[J]. Journal of Transportation

Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 125-138.

- [6] LAM W H K, LO H P, ZHANG N. A quasi-dynamic traffic assignment model with time-dependent queues[J]. HKIE Transactions, 1996, 3(2): 7-14.
- [7] SMITH M, HUANG W, VITI F, et al. Quasi-dynamic traffic assignment with spatial queueing, control and blocking back[J]. Transportation Research Part B:Methodological, 2019, 122: 140-166.
- [8] BLIEMER M C J, RAADSEN M P H, SMITS E S, et al. Quasi-dynamic traffic assignment with residual point queues incorporating a first order node model[J]. Transportation Research Part B:Methodological, 2014, 68: 363-384.
- [9] TAMPERE C M J, CORTHOOT R, CATTRYSSSE D, et al. A generic class of first order node models for dynamic macroscopic simulation of traffic flows[J]. Transportation Research Part B:Methodological, 2011, 45(1): 289-309.
- [10] TAJTEHRANIFARD H, BHASKAR A, NASSIR N, et al. A path marginal cost approximation algorithm for system optimal quasi-dynamic traffic assignment[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2018, 88: 91-106.
- [11] NAKAYAMA S, CONNORS R. A quasi-dynamic assignment model that guarantees unique network equilibrium[J]. Transportmetrica A:Transport Science, 2014, 10(7): 669-692.
- [12] CHAN C, KUNCHERIA A, ZHAO B, et al. Quasi-dynamic traffic assignment using high performance computing[EB/OL]. (2021-04-26) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.12911>.
- [13] VAN DER GUN J P T, PEL A J, VAN AREM B. Travel times in quasi-dynamic traffic assignment[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2020, 16(3): 865-891.
- [14] HAN K, EVE G, FRIESZ T L. Computing dynamic user equilibria on large-scale networks with software implementation[J]. Networks and Spatial Economics, 2019, 19: 869-902.
- [15] LONG J C, SZETO W Y, GAO Z Y, et al. The nonlinear equation system approach to solving dynamic user optimal simultaneous route and departure time choice problems[J]. Transportation Research Part B:Methodological, 2016, 83: 179-206.

(责任编辑: 孟晓燕)