

# 基于蚁群算法的动态用户均衡配流<sup>①</sup>

曹继英<sup>1</sup>, 安毅生<sup>1</sup>, 乔雄<sup>2</sup>, 赵金剑<sup>1</sup>, 杨丽娜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(长安大学 信息工程学院, 西安 710064)

<sup>2</sup>(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

**摘要:** 在路网中, 为了使用户的出行时间降到最低, 提出一个适用于多 OD 对的路网的动态用户均衡离散模型, 并应用蚁群算法求解动态用户均衡问题. 通过设计一个算例, 利用仿真得出路网中的流量分配数据, 并和二次规划 Frank-Wolfe 算法求解的流量分配数据进行比较, 最后得出蚁群算法在求解动态交通用户均衡问题时具有一定的优势.

**关键词:** 动态用户均衡; 蚁群算法; Frank-Wolfe 算法

## Implementation of Dynamic User Equilibrium Model Based on Ant Colony Algorithm

CAO Ji-Ying<sup>1</sup>, AN Yi-Sheng<sup>1</sup>, QIAO Xiong<sup>2</sup>, ZHAO Jin-Jian<sup>1</sup>, YANG Li-Na<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(College of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

<sup>2</sup>(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** This paper presented a multi-OD dynamic user equilibrium model based on the road network, in order to enable users to minimize travel time in the network. It uses Ant Colony algorithm to solve the problem of dynamic user equilibrium. By designing a numerical example and employing simulation we obtain traffic flow distribution data which compared traffic flow distribution data of Frank-Wolfe algorithm in the road network. The conclusion is that Ant Colony algorithm has certainly advantage in solving the problem of dynamic traffic user equilibrium.

**Key words:** dynamic user equilibrium; ant colony algorithm; Frank-Wolfe algorithm

动态交通流分配<sup>[1]</sup>(Dynamic Traffic Assignment, 简称 DTA)是将实时变化的交通网络中的出行者合理地分配到不同的路径上. 动态交通流分配模型能够再现实际交通状态, 根据当前交通路网状况实时调整交通路网中流量的分布, 引导用户的路径选择行为, 从而避免交通拥挤, 缩短用户的出行时间, 使整个路网达到最优使用状态. 动态交通配流模型<sup>[2]</sup>包括动态系统最优(Dynamic Systemic Optimal, 简称 DSO)模型和动态用户均衡(Dynamic User Equilibrium, 简称 DUE)模型. DSO 解决的问题是整个路网上每个路段的交通流量尽可能达到平衡它是从管理者的角度出发的, 而 DUE 解决的主要问题则是整个路网的时间消耗达到最低, 所以 DUE 更能满足用户的需求, 而本文主要研究的是动态用户均衡问题.

蚁群算法(Ant Colony System, ACS)<sup>[3]</sup>是根据蚂蚁

种群总能在巢穴与食物源之间找到最短路径而提出的一种搜索算法, 具有正反馈、鲁棒性和启发式搜索等特点. Mussone<sup>[4]</sup>等在 ACS 的元启发式方法的基础上进行改进, 对 DUE 和 SUE 交通配流进行了研究. Gallo 等<sup>[5]</sup>提出了基于 ACS 的城市路网信号设置优化求解算法, 主要是通过模拟用户路径选择行为和蚁流对信号设置的需求压力进行的. Alves 等<sup>[6]</sup>在确定性目标函数的基础上利用蚁群算法处理用户均衡问题并对离散路径进行了分析. 在国内, 徐勋倩等<sup>[7]</sup>利用蚂蚁算法处理固定需求交通平衡分配问题. 杜波等<sup>[8]</sup>在基于目标模型的基础上利用蚁群算法对用户平衡分配方法进行研究. 夏媛媛等<sup>[9]</sup>把蚁群算法与混沌优化相结合求解城市路网中的动态用户最优配流问题. 安毅生<sup>[10]</sup>等利用蚁群算法求解城市路网中动态路径选择优化问题.

本文把蚁群算法中的状态转移规则、信息素更新

① 收稿时间:2015-04-15;收到修改稿时间:2015-06-11

规则与用户选择路径过程中的路段状态方程和路段流量函数相结合,提出基于蚁群算法的动态用户均衡离散模型,通过对路段上流量的计算,实现了时变OD需求下动态用户均衡路径选择的模拟与优化。

## 1 动态用户均衡离散模型

动态用户均衡<sup>[11]</sup>是指在任一时刻、任一决策点上,所有被使用的路径上的瞬时阻抗都相等且等于最小瞬时路径阻抗,而所有未被使用的路径上的瞬时阻抗都不小于这个最小瞬时阻抗。因此,动态用户均衡问题就是在出行者选择瞬时阻抗最小的路径时,确定当前路网中任意时刻各路段上的流量。离散对象指的是时间,是指将一个时间段分为多个,针对每个小时段上的流量进行分析。离散化的模型<sup>[12]</sup>,可以通过数学上的非线性规划方法来实现,表达式如(1)式所示:

$$\min_{u,v,x} J = \sum_{k=1}^K \sum_a \left[ \int_0^{u_a(k)} g_{1a}[x_a(k),w] dv + \int_0^{v_a(k)} g_{2a}[x_a(k),w] dw \right] \quad (1)$$

s.t

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + u(k) - v(k), & \forall a, s, k \\ \sum_l v(k) + g(k) = \sum_l u(k), & \forall l \neq s, s, k \\ x(k) = \sum_l v(l), & \forall a, s, k \\ x(t) \geq 0, u(t) \geq 0, v(t) \geq 0, & \forall a, s, t \\ x(t) = 0, v(t) = 0 & \forall a, s \end{cases}$$

其中  $u_a(t)$  为  $t$  时刻进入路段  $a$  的流入率;  $u_a^s(t)$  为  $t$  时刻进入路段  $a$  的且要到终点  $s$  的流入率(决策变量);  $v_a(t)$  为  $t$  时刻离开路段  $a$  的流出率;  $v_a^s(t)$  为  $t$  时刻离开路段  $a$  的且要到终点  $s$  去的流入率(决策变量);  $x_a(t)$  为  $t$  时刻路段  $a$  上的流量(状态变量);  $g_a^s(t)$  为  $t$  时刻节点  $l$  产生的且要到终点  $s$  去的流量速率;  $c_a(t)$  为  $t$  时刻在路段  $a$  上的瞬时阻抗。  $c_a(t)$  由两部分组成: ①路段  $a$  上的与流量有关的瞬时行驶时间  $g[x_a(t), v_a(t)]$ ; ②路段  $a$  上的排队延迟  $g_{2a}[x_a(t), v_a(t)]$ ; 则  $c_a(t) = g_{1a}[x_a(t), v_a(t)] + g_{2a}[x_a(t), v_a(t)]$ 。

对公式(1)的求解算法在文献[12]中给出有 F-W 算法、对角化算法、投影算法、修正的投影算法等。这些算法的优点是不需要将网络进行时空展开,只需在原始网络上进行就可以了,大大减少了计算复杂度。在先前经验的基础上,本文提出蚁群算法来解决路网中的多 OD 交通分配问题,将交通分配流较好的分配在路网中。

本文用动态用户均衡的离散模型来实现路径的计算及流量的分配。将一个时间段分成多个,这就是与一般的用户最优模型的区别。在一般的用户均衡模型中,只考虑一个时间段,因此,动态用户均衡模型具有以下几个不同:(1)它的整体分配不仅依赖于本时段,还与前面时段的流量有关;(2)任意点的交通量不仅与该点的需求相关,与流进它的流量也有关系。因此,该模型更能反映当前的路网状况节点。

## 2 基于蚁群算法的实现

### 2.1 蚁群算法概述

将蚁群算法应用在动态用户均衡分配中的基本思路是:首先初始化,将所有蚂蚁随机的放在路网中,每只蚂蚁独立进行路径选择。在路径搜索过程中,蚂蚁根据负反馈机制更改每条路径上的信息素,即蚂蚁所走的路径上的信息素强度反而减少。这样扩大了算法的搜索空间,避免算法陷入局部最优。再通过全局信息素更新,当所有蚂蚁都找到自己的路径之后,最优路径上的信息素会得到加强,从而提高了算法的收敛速度。

蚁群系统的转移规则如(2)式所示:

$$j = \begin{cases} \arg_{l \in N_i^s} \max \{ \tau_{ij} [\eta_{ij}]^q \}, & \text{if } q \leq q_0 \\ J & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

在公式(2)中,  $q$  是一个随机变量,它均匀的分布在  $[0,1]$  区间上。是在一定取值范围内的一个已知参数。 $J$  可以由概率转移公式求得。在这个转移规则中,通常趋向于选择信息素较强的路段作为选择方向。参数决定了路径选择依赖于信息素的相对重要性。

信息素的更新规则如下:

1)全局信息素更新规则如公式(3)所示:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{bs}, \forall (i,j) \in T^{bs} \quad (3)$$

2)局部信息素的更新规则如公式(4)所示:

$$\tau \leftarrow (1-\xi)\tau + \xi\tau \quad (4)$$

蚂蚁选择下一个节点必须遵循两条基本规则<sup>[13]</sup>:

1)下一个节点必须与当前节点相邻,也就是说中间不存在其他节点且只存在一条路段,选择性越多,收敛速度越慢;

2)对于路网中的节点,不能重复访问,这与蚂蚁系统求解旅行商问题的要求一致。在动态用户均衡模型中,蚂蚁将路网阻抗作为路径选择依据。

### 2.2 蚁群算法解决动态用户均衡控制模型

算法步骤如下:

Step1: 定义一个函数, 输入参数为路网基础属性: 路段长度、OD 需求、邻接表以及路径选择禁忌表以及蚁群算法中上面的几个参数; 输出参数为整个路网上所有的路段流量;

Step2: 起点和终点定义函数求出两点间的所有路径(路径均由路段构成);

Step3: 规定迭代次数, 开始迭代;

Step4: 对应 OD 对找出两点间的路径依据表达式(5)求出每条路径上的阻抗, 同时, 将路径上的最大信息素设为最大值 1;

$$Q = l_a * e_{am}, \quad t = \frac{l}{v}, \quad t_a = t_0 \left\{ 1 + \partial \left( \frac{V_a}{Q_a} \right)^\beta \right\}, \quad \eta_{ij} = \frac{1}{c_{ij}} \quad (5)$$

Step5: 确定 OD 需求, 开始蚁群搜索;

Step6: 蚂蚁数根据 OD 需求而定, 根据公式开始选择路径, 并用轮赌法实现路径选择;

Step7: 对 Step6 中所选择的路径上信息素更新, 同时更新该路径上的流量;

Step8: 如果所有蚂蚁遍历完成, 则进入 Step9, 否则回到 Step7;

Step9: 所有蚂蚁遍历完成之后, 全局信息素更新; 如果所有的 OD 需求分配完成, 进入 Step10, 否则回到 Step5;

Step10: 根据表达式(6)计算出 k 时刻各路段上的阻抗, 再根据(7)算出流量的流出  $v_a^s(k)$  和流入  $u_a^s(k)$ . 最后, 根据(8)得出此刻路段上的流量分布;

$$c_a = t_0 \{ 1 + \partial \left( \frac{S_a}{Q} \right)^\beta \} \quad (6)$$

$$v_a^s(k) = \frac{X_a^s(k)}{c_a^s}, \quad \sum_{a \in B_j} u_a^s(k) = \sum_{a \in A_i} V_a^s(k) + g_i^s(k) \quad (7)$$

$$x(k+1) = x(k) + u(k) - v(k) \quad (8)$$

Step11: 如果迭代完成, 则结束, 输出各路段上的流量. 否则, 返回 Step3 继续循环迭代.

在算法可解的基础上, 通过与二次规划函数 Frank-Wolfe 算法比较进一步确定算法是有效的.

### 3 算例

给出一个路网模型验证和算法算例, 路网如图 4-1 所示, 其中路网节点集合为{①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬}, 路段集合为{1, 2, 3, 4, 5,

6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19}, 括号内数字为路段长度. 文中 OD 对共有四个, 起点分别为节点 1 与节点 4; 终点分别为节点 2 与节点 3.

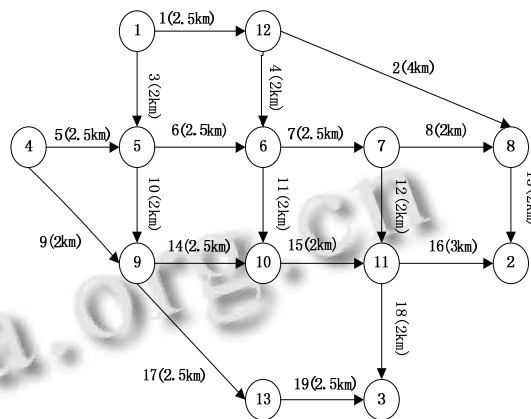


图 1 路网图

本文中规定路段上的参数为: 阻塞密度为  $K = 125 \text{pcu} \cdot \text{km}$ ; 自由流速为  $v = 40 \text{km} \cdot \text{h}$ ; 在每个小的时间段以内, 各个时段 OD 对间产生的交通需求如表 1 所示.

表 1 OD 对需求

时段	OD (1,2)	OD (1,3)	OD (4,2)	OD (4,3)
K=1	18	8	7	15
K=2	19	12	11	16
K=3	27	13	9	19
K=4	22	15	11	22
K=5	21	16	12	23
K=6	25	20	13	28
K=7	23	22	15	30
K=8	24	17	14	26
K=9	30	23	20	33
K=10	28	30	15	25

所有路网中的候选路径如表 2 所示.

表 2 路网中的候选路径

OD 对	路径编号	路径组成
(1,2)	路径 1	1->5->6->7->8->2
	路径 2	1->5->6->7->11->2
	路径 3	1->5->6->10->11->2
	路径 4	1->5->9->10->11->2
	路径 5	1->12->6->7->8->2
	路径 6	1->12->6->7->11->2
	路径 7	1->12->6->10->11->2

OD 对 (1,3)	路径 8	1->12->8->2	OD 对 (4,3)	路径 18	4->5->9->10->11->2
	路径 9	1->5->6->7->11->3		路径 19	4->9->10->11->2
	路径 10	1->5->6->10->11->3		路径 20	4->5->6->7->11->3
	路径 11	1->5->9->10->11->3		路径 21	4->5->6->10->11->3
	路径 12	1->5->9->13->3		路径 22	4->5->9->10->11->3
OD 对 (4,2)	路径 13	1->12->6->7->11->3	路径 23	4->5->9->13->3	
	路径 14	1->12->6->10->11->3	路径 24	4->9->10->11->3	
	路径 15	4->5->6->7->8->2	路径 25	4->9->13->3	
	路径 16	4->5->6->7->11->2			
	路径 17	4->5->6->10->11->2			

蚁群算法在每个时刻计算流量结果如表 3 所示.

表 3 蚁群算法计算的流量结果

时段	流量									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
路段 13	4.66	3.30	4.26	4.81	8.06	8.78	10.37	11.30	11.84	9.24
路段 16	12.27	26.20	34.08	39.78	40.29	42.09	41.96	41.86	41.78	45.34
路段 18	15.16	21.68	28.98	32.07	35.62	35.36	34.62	35.36	37.54	36.48
路段 19	6	12.66	13.11	14.74	13.82	15.88	17.92	17.94	15.96	17.31
路段 3	12.24	14.14	18.16	22.84	24.41	28.82	28.48	29.44	26.51	24.21
路段 5	14	20	30	35.33	40.22	40.81	43.20	41.47	42.98	43.32
路段 6	15.33	16.88	29.92	33.95	38.63	46.42	48.94	50.63	50.42	46.94
路段 4	3.5	12.54	14.89	13.35	14.20	11.20	12.36	10.71	14.41	15.99
路段 7	13.33	13.55	23.70	24.46	31.64	33.76	37.84	39.22	38.15	37.43
路段 8	2.91	2.28	3.66	3.88	7.51	8.46	10.19	10.02	11.09	7.64
路段 9	5.25	11.22	9.46	9.60	8.52	10.22	9.46	11.93	11.04	11.11
路段 10	11.08	16.96	18.06	23.95	25.63	23.70	23.74	22.01	21.01	22.17
路段 12	8.74	8.60	15.51	14.88	16.85	16.82	17.98	18.65	16.13	18.74
路段 15	16.33	32.86	37.25	43.31	43.34	43.37	40.46	39.93	44.29	43.34
路段 17	6	12.66	13.11	14.74	13.82	15.88	17.92	17.94	15.96	17.31

将二次规划求解结果和蚁群算法求解结果数据绘制成柱状图分别如图 2、图 3 所示.

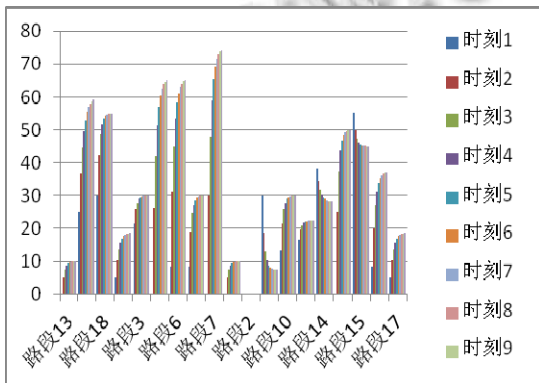


图 2 二次规划求解柱状图

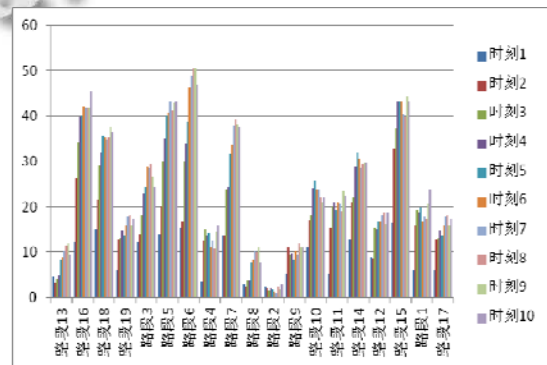


图 3 蚁群算法求解柱状图

通过图 2、图 3 比较可以发现, 图 2 中各路段的流量并不均衡, 如 2 路段没有流量分布, 一些路段如 8、13 上流量分布很小, 一些路段如 5、6、7 上流量分布

很大. 而图 3 采用蚁群算法的流量分布较图 2 有明显的改进, 路段 2 上有流量分布, 其他路段上的流量分布较均匀. 随着 OD 需求和时间的增加, 各路段流量变化较缓慢, 有助于减少用户的走行时间.

#### 4 结语

动态交通用户均衡问题解决的是如何使用户的出行时间降到最低, 使各路段上的流量能较好的分布. 本文通过设计一个算例, 通过二次规划和蚁群算法的比较得出蚁群算法能较好的解决动态用户均衡问题, 使各路段上的流量分配情况比较均衡, 随着 OD 需求和时间的增加, 各路段的流量变化较缓慢, 这样就有有助于用户的出行时间.

#### 参考文献

- 1 杨兆升. 智能系统概论. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- 2 陆化普. 交通规划理论与方法. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- 3 Inaki C, de Viana F, Herrera F. A new ACO model integrating evolutionary computation concepts: the best-worst ant system. Proc. of ANTS'2000. From Ant Colonies to Artificial Ants: Second International Workshop on Ant Algorithms, Brussels, Belgium. September 7-9. 2000. 22-29.
- 4 Mussone L, Matteucci M. An application of ant colony systems for DUE and SUE assignment in congested transportation networks. Proc. of the 11th World Conference on Transport Research. Berkeley, CA, USA. 2007.
- 5 Gallo M, D'Acierno L, Montella B. An ant colony optimisation algorithm for solving the asymmetric traffic assignment problem. European Journal of Operational Research, 2012, 217(2): 459-469.
- 6 Alves D, Ast J. Ant colony optimisation for traffic dispersion routing. Proc. of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Operational Research, Madeira Island, Portugal. 2013. 683-688.
- 7 徐勋倩, 王亚萍. 用蚂蚁算法处理固定需求交通平衡分配问题. 南通工学院学报(自然科学版), 2004, 3(2): 24-27.
- 8 杜波, 邵春福. 基于蚁群算法的用户平衡分配方法研究. 物流技术, 2009, 28(12): 155-157.
- 9 夏媛媛, 马立云, 王晓原. 基于混沌蚁群算法的动态用户最优配流方法. 山东理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(3): 17-21.
- 10 安毅生, 袁绍欣, 赵祥模, 等. 基于蚁群算法的动态路径选择优化方法. 交通系统工程与信息, 2014, 14(3): 97-102.
- 11 Carey M. A constraint qualification for dynamic traffic assignment model. Transportation Science, 1986, 20(1): 55-58.
- 12 高自友, 任华玲. 城市动态交通流分配模型与算法. 北京人民交通出版社, 2005.
- 13 杨丽娜, 安毅生. 基于蚁群算法与 GIS 的动态交通分配模型研究[硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.