

文章编号:1671-8879(2011)02-0081-05

动态交通流分配模型

王秋平,王中芳,赵 硕

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:为了构造更先进的动态交通流分配模型,针对城市道路上车流的速度和密度特性,利用 Green-shields 速度密度关系对元胞传输模型进行了优化改进。改进后的模型能较好地模拟城市道路上交通流的运行特性,且在保证计算精度的同时,降低了算法的计算复杂度。算例结果表明,该模型可以出色地再现路段上时变的交通流,使乘客在任意节点都能获得当时交通条件下到达终点的最短路径,从而实现其交通分析与诱导功能。

关键词:交通工程;动态交通流分配模型;速度密度特性;元胞传输模型

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Research on dynamic traffic assignment model

WANG Qiu-ping, WANG Zhong-fang, Zhao-shuo

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to establish a more advanced dynamic traffic assignment model, based on the analysis of existent models, an improved dynamic traffic assignment model was proposed. In accordance with speed and density characteristic of the traffic flow on urban road, the new model uses Green-shields model to optimize the existent cellular transportation model. The improved model can simulate the move characteristic of traffic flow, ensure the calculation accuracy and reduce the computational complexity of the algorithm. The test example show this model can describe the time-changed traffic flow and find the shortest path to terminal to achieve the function of traffic analysis and induction. 1 fig, 3 tabs, 7 refs.

Key words: traffic engineering; dynamic traffic assignment model; speed and density characteristic; cellular transportation model

0 引 言

近年来,在交通运输工程的许多研究领域,如交通规划、交通管理及控制等领域都广泛地应用到了动态交通流分配理论。动态交通流分配是指将时变的交通出行合理地分配到不同的路径上,在交通

供给与交通需求状况均已知的条件下,分析交通流的最优分布模式,从而为交通管理与控制、动态路径诱导等提供依据^[1]。正确的动态交通流分配模型,能较好地再现实际交通状态,而这种实际的交通状态是交通网络用户路径选择的结果^[2]。从 20 世纪 50 年代开始,许多西方的交通工程理论研究者就致

收稿日期:2010-04-15

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2007E232);陕西省教育厅专项基金项目(08JK334);

西安建筑科技大学学科重点培育计划人才培养专项项目(XK201101)

作者简介:王秋平(1962-),女,陕西城固人,教授,工学博士,E-mail:583990445@qq.com。

力于交通流分配领域的研究和发展;虽然对城市动态交通流分配理论的研究是从 20 世纪 70 年代中期才开始,但是众多学者已在此领域取得了多方面的研究成果。该领域的研究总体上表现为,国外在理论、方法及应用上的研究较之中国要超前,同时,无论国外还是中国都偏重于理论方面的研究,而在实际应用上还有待于进一步深入。随着 ITS(智能运输系统)技术的发展,如何建立更具有实用价值的动态交通流分配模型已成为了交通运输领域学者们最感兴趣的课题之一。为此,本文采用 Green-shields 速度密度关系模型对已有 CTM 模型进行了改进。改进后的模型能够更精确地描述路段阻抗,且在保证计算精度的同时降低了算法的计算复杂度。

1 参数说明及相关约束条件

在有多个起终点的强连通交通网络中,定义:起点集 R ,起点 $r \in R$;终点集 S ,终点 $s \in S$;中间节点集 L ,节点 $l \in L$;路段集 A ,路段 $a \in A$ 。 A_l 为进入节点 l 的路段集合, B_l 为离开节点 l 的路段集合。研究时段集 $[0, T]$ (T 为研究时段长),时刻 $t \in [0, T]$,其他变量定义为:

$u_a(t)$ 为 t 时刻路段 a 的驶入量; $u_a^s(t)$ 为 t 时刻进入路段 a 要到终点 s 去的驶入量; $v_a(t)$ 为 t 时刻路段 a 的驶出量; $v_a^s(t)$ 为 t 时刻进入路段 a 要到终点 s 去的驶出量; $x_a(t)$ 为 t 时刻路段 a 上的交通量; $x_a^s(t)$ 为 t 时刻路段 a 上流向终点 s 的交通量; f_k^s 为 OD 对 (r, s) 间 t 时刻第 k 条路径上的交通流量; $g_l^s(t)$ 为 t 时刻在节点 l 上产生的要到终点 s 去的流量(已知); $\tau_a(t)$ 为 t 时刻进入路段 a 的实际阻抗; $c_a(t)$ 为 t 时刻进入路段 a 的瞬时阻抗^[3]。该阻抗与当时路段的车流状态有关,与后来的出行者无关。路段 a 的瞬时阻抗 $c_a(t)$ 为

$$c_a(t) = f[(x_a(t), u_a(t), v_a(t))]$$

定义了以上的符号后,可以给出路段 a 的相关约束为

$$x_a^s(t+1) = x_a^s(t) + u_a^s(t) - v_a^s(t) \quad (\text{路段状态方程})$$

$$\sum_{a \in B_l} u_a^s(t) = g_l^s(t) + \sum_{a \in A_l} v_a^s(t)$$

$$\sum_{a \in A_s} v_a^s(t) = 0, \quad \forall s, t \quad (\text{节点流量平衡方程})$$

$$t + \Delta t + \tau_a(t + \Delta t) > t + \tau_a(t) \quad (\text{先进先出约束})$$

$$x_a^s(t) \geq 0, \quad u_a^s(t) \geq 0, \quad v_a^s(t) \geq 0$$

$$\forall a, s, t \quad (\text{非负约束})$$

$$x_a^s(0) = 0, \quad v_a^s(0) = 0, \quad \forall a, s \quad (\text{边界条件})$$

2 动态交通流分配模型

建立动态交通流分配模型的关键问题是,要出色地再现路径上时变的交通流。目前,在动态交通流分配模型中,广泛使用二次函数型路段行程时间,且假设路段上不存在匝道(车流仅从路段的入口流入)和超车现象,但实际的城市道路车流状况要复杂得多。已有研究成果对路段阻抗函数的描述不够准确,影响了模型的应用。随着 ITS 的快速发展,迫切需要研究更符合实际的路段阻抗函数,以构造更为先进的动态交通流分配模型。

2.1 基于 CTM 模型的动态交通流分配

1994 年美国加州大学伯克利分校的工程师 Daganzo 首先采用元胞自动机(Cellular Automata, 简称 CA)的概念,建立了 CTM 模型,用来研究动态交通问题。CTM 模型通过追踪车流的出发时间、走行路径、元胞走行时间等,来确定各个时段某一特定路段上每个元胞的车辆占有情况,进而根据这些数据,采用平均瞬时阻抗的方法来确定实际阻抗。

在 CTM 模型中,路网由元胞集 I 和路段集 A 组成。路段被划分成了多个等距的小段(元胞),其中元胞的长度等于自由车流在一个时间步长内行走的距离。如果把路段 a 划成 n 个小段,每个小段记为 i ($1 \leq i \leq n$);研究时段 $[0, T]$ 也被划分为 m 个小段,每个小段长度为 δ , $T = \delta m$ ^[4]。则

$$x_i(\theta+1) = x_i(\theta) + u_i(\theta) - u_{i+1}(\theta) \quad (1)$$

$$u_i(\theta) = \min\{x_{i-1}(\theta), Q(\theta), [W/V_f(N_i(\theta) - x_i(\theta))]\} \quad (2)$$

式中: i 为元胞; $i+1, i-1$ 为 i 的下游(上游)元胞; $x_i(\theta)$ 为时刻 θ 元胞 i 上的车辆数; $u_i(\theta)$ 为时刻 θ 元胞 i 的实际流入量; $N_i(\theta)$ 为时刻 θ 元胞 i 能够承载的最大车辆数; $Q(\theta)$ 为时刻 θ 元胞最大允许流入量; V_f 为自由流速度; W 为后向激波传播速度(拥挤交通中扰动向后传播的速度)。

计算过程中,首先构造起点元胞的一个虚拟上游元胞 $r-1$,根据出行需求量将交通量加载到路网上,并把时刻 $\theta = t$ 的流入量加载到这个上游元胞上,则有

$$u_{(r-1),k}(\theta) = f_k^s(t) \quad (3)$$

$$x_{(r-1),k}(\theta+1) = x_{(r-1),k}(\theta) + u_{(r-1),k}(\theta) - u_{rk}(\theta) \quad (4)$$

从式(3)、式(4)中可以看出,如果给定流入量 $f_k^s(t)$,即可得到任意时刻 θ 路径 k 上元胞 i 的车辆数

$x_{ik}(\theta)$, 然后, 根据这些数据来确定整个模型的实际阻抗。

CTM 模型采用分段线性拟合的方法来估计路段阻抗。该方法在模拟动态排队现象的同时, 还可以捕捉到交通流中的不连续变化现象。但是, 其巨大的计算量阻碍了模型在实际路网中的应用。

2.2 基于 Green-shields 模型的动态交通流分配

当路段上车辆增多、车流量加大时, 车速会随之下降; 反之, 当车辆减少、车流密度变小时, 车速会随之提高。路段上车流的速度与密度的关系可用 Green-shields 模型表示为

$$V_a(t) = V_a^{\min} + (V_a^{\max} - V_a^{\min}) \left[1 - \left(\frac{k_a(t)}{k_{a, \text{jam}}} \right)^\alpha \right]^\beta \quad (5)$$

$$c_a(t) = \frac{L_a}{V_a(t)} = \frac{L_a}{V_a^{\min} + (V_a^{\max} - V_a^{\min}) \left[1 - (k_a(t)/k_{a, \text{jam}})^\alpha \right]^\beta} \quad (6)$$

式中: $V_a(t)$ 为 t 时刻路段 a 上的速度; $k_a(t)$ 为 t 时刻路段 a 上的密度; V_a^{\min} 、 V_a^{\max} 分别为路段 a 上的最小出行速度和最大出行速度; $k_{a, \text{jam}}$ 为路段 a 上的阻塞密度; α 、 β 为模型参数 (需根据路段具体情况用统计推广的方法来确定); L_a 为路段 a 的长度。

Green-shields 模型给出了动态路段出行阻抗函数的表达式, 减少了路段出行阻抗的计算量。但是, 该模型仅适用于走行时间大部分花费在路段上的高速公路和城市主干道, 对于交通高度拥挤的城市交通网络, 该模型的适用性不及 CTM 模型。

2.3 改进的动态交通流分配模型

对于每个 OD 对来说, 在任意时刻 t , 同时出发的出行者的实际路径阻抗相等且最小, 所有未被使用的路径, 其实际阻抗都不小于这个最小实际阻抗, 那么, 此时网络上的流量状态就是基于实际路径阻抗的理想 DUO 状态^[5]。

CTM 模型把道路宏观仿真模型用于估计实际路段阻抗, 但巨大的计算量阻碍了其在实际交通网络中的应用; Green-shields 模型仅使用速度与密度的关系, 并不能完全描述间断道路交通流。因此, 为克服 CTM 模型和 Green-shields 模型的缺点, 本文结合以上 2 种模型的特点, 建立了新的动态交通流分配模型。

$$\text{目标函数 min: } Z(x) = \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^n \tau_a(t) [x_a(t), u_a(t), v_a(t)] \quad (7)$$

约束条件

$$x_a^s(t+1) = x_a^s(t) + u_a^s(t) - v_a^s(t) \quad (8)$$

$$\sum_{a \in B(l)} u_a^s(t) = g_l^s(t) + \sum_{a \in A(l)} v_a^s(t) \quad (9)$$

$$\sum_{a \in A(s)} u_a^s(t) = 0, \quad \forall s, t \quad (10)$$

$$t + \Delta t + \tau_a(t + \Delta t) > t + \tau_a(t), \quad \forall a \quad (10)$$

$$x_a^s(t) \geq 0, u_a^s(t) \geq 0, v_a^s(t) \geq 0, \quad (11)$$

$$x_a^s(0) = 0, v_a^s(0) = 0 \quad (11)$$

如果路段较短或走行时间较短, 则目标函数式 (7) 中的实际阻抗 $\tau_a(t)$ 与瞬时阻抗 $c_a(t)$ 之间的差别就很小, 即 $\tau_a(t) \approx c_a(t)$ 。若将路段 a 的长度 L_a 划分为 n 个长度相等的元胞, 则 t 时刻路段 a 上的交通流量 $x_a(t) = \sum_{i=1}^n x_{ai}(t)$ 。

城市交通网络规模庞大复杂, 变量数目繁多。由于调查所获取的 OD 数据均为离散形式, 因此, 可用离散化的方法求解动态交通流分配模型。在任意时刻 t 路段元胞 i ($1 \leq i \leq n$) 上 $\tau_{ai}(t) = c_{ai}(t)$ ^[6]。

$$\tau_a(t) = \sum_{i=1}^n \tau_{ai}(t) = \sum_{i=1}^n c_{ai}(t) \quad (12)$$

1934 年, Green-shields 提出了速度与密度单线段式直线关系模型^[7]。

$$V = V_f \left(1 - \frac{K}{K_j} \right) \quad (13)$$

式中: K_j 为阻塞密度; K 为与车流运行速度 V 相对应的密度。

式 (13) 适用于车流密度适中的情况。当车流密度很大时, 一般采用 Greenberg 提出的对数模型

$$V = V_m \ln \left(\frac{K_j}{K} \right) \quad (14)$$

式中: V_m 为临界速度, 一般取 $V_m = \frac{1}{2} V_f$ 。

研究表明, 当 $K \leq 0.4 K_j$, 采用式 (13); 当 $K > 0.4 K_j$ 时, 采用式 (14) 计算 V 较为合理。

3 数值算例

算例路网如下页图 1 所示。图 1 中, ①、②、③、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑨、⑩、⑪、⑫ 为路网节点; 1、2、3、④、5、6、7、8、9、10、11 为路段号; 路段号后括号内的数值为路段长度; 节点 ①、③ 为起点 O_1 、 O_2 , 节点 ⑥、⑧ 为终点 D_1 、 D_2 。以上节点及路段共组成了 12 条路径, 路径组成见下页表 1。

路网具体输入参数如下所示。

阻塞密度 $K_j = 125 \text{ veh/km}$; 自由流速 $V_f = 40$

km/h;通行能力为 1 250 veh/h;每个小时段的长度 $\delta = 2\text{ min}$;研究时段 $T = 30\text{ min}$ 。

各小时段内,由各节点所产生的分别到达终点 D_1 、 D_2 的交通量见表 2;各时段所对应的路径走行时间见表 3。

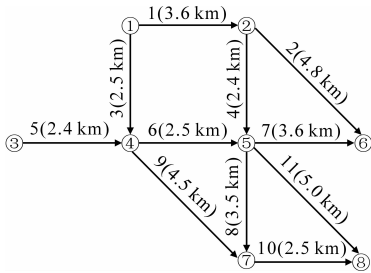


图 1 算例路网

表 1 路径组成

OD 对	路径	路段组成	里程/km
(O_1, D_1)	1	1—2	8.4
	2	1—4—7	9.6
	3	3—6—7	8.6
(O_1, D_2)	4	1—4—11	10.9
	5	1—4—8—10	12.0
	6	3—6—11	10.0
	7	3—6—8—10	11.0
	8	3—9—10	9.5
(O_2, D_1)	9	5—6—7	8.5
(O_2, D_2)	10	5—6—11	9.9
	11	5—6—8—10	10.9
	12	5—9—10	9.4

表 2 各时段内每个节点所产生的到终点 D_1 、 D_2 的交通量

单位:veh

时段	节点①		节点②		节点③		节点④		节点⑤		节点⑦
	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	D_2
1	7	1	6	4	2	7	2	4	4	3	2
2	8	2	5	6	4	4	1	3	6	4	4
3	6	2	2	5	0	6	4	0	5	5	8
4	7	3	5	2	1	8	1	2	4	8	5
5	8	4	7	4	3	7	0	3	8	4	7
6	8	4	6	6	4	9	4	6	6	8	8
7	10	4	4	7	3	10	3	4	8	7	7
8	11	7	5	2	5	7	2	5	7	5	9
9	9	6	7	5	3	11	7	7	8	9	6
10	13	8	7	8	6	10	4	6	9	11	10
11	14	10	11	8	9	12	8	10	10	11	12
12	16	9	9	10	10	14	7	13	12	13	13
13	13	11	12	12	8	15	7	11	13	9	9
14	18	9	8	7	7	13	10	13	14	10	10
15	21	12	9	9	6	16	11	12	11	9	11

表 3 各时段所对应的路径走行时间

单位:min

时段	路径											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	12.60	14.40	12.90	16.35	18.00	15.00	16.50	14.25	12.75	14.85	16.35	14.10
2	12.77	14.59	12.95	16.68	18.14	15.04	16.50	14.30	12.91	15.00	16.46	14.26
3	12.93	14.82	13.03	16.88	18.34	15.09	16.55	14.25	13.09	15.15	16.61	14.31
4	13.01	15.03	13.20	17.11	18.56	15.28	16.73	14.60	13.23	15.31	16.76	14.63
5	13.18	14.98	13.32	17.22	18.49	15.56	16.83	14.73	13.32	15.56	16.83	14.73
6	13.29	15.08	13.36	17.28	18.52	15.56	16.80	14.88	13.41	15.61	16.85	14.93
7	13.41	15.25	13.47	17.44	18.72	15.68	16.96	15.22	13.52	15.73	17.01	15.27
8	13.69	15.33	13.42	17.57	18.85	15.66	16.94	15.37	13.51	15.72	17.03	15.46
9	13.50	15.12	13.75	17.37	17.76	16.00	17.39	15.81	13.63	15.88	17.27	15.69
10	13.51	15.15	13.87	17.48	18.77	16.20	17.49	16.02	13.75	16.08	17.37	15.90
11	13.64	15.38	14.04	17.60	19.09	16.26	17.75	16.12	14.10	16.32	17.81	16.18
12	13.83	15.73	14.22	17.90	19.48	16.39	17.97	16.53	14.37	16.52	18.10	16.66
13	13.88	16.12	14.98	18.19	19.78	17.50	18.64	16.34	15.07	17.14	18.73	16.43
14	14.04	16.16	14.96	18.49	19.94	17.29	18.74	16.63	15.22	17.55	19.00	16.89
15	14.15	16.23	14.91	19.00	19.97	17.68	18.65	17.17	15.04	17.81	18.78	17.30

(2)新建模型只考虑了由于出行量的增大而引起的延迟和排队现象,而没有考虑信号控制的影响;在以后的研究中,可以把信号控制引起的排队和延迟也考虑到交通路网中,并将此模型应用于交通信

- [1] 邵春福. 交通规划原理[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004.
- [2] 陆化普. 交通规划理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [3] 何胜学. 多用户动态交通流分配模型及算法研究[J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(5): 460-464.
HE Sheng-xue. Multi-user dynamic traffic assignment model and relevant algorithm[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2006, 28(5): 460-464.
- [4] Lo H K, Szeto W Y. A cell-based variation inequality formulation of the dynamic user optimal assignment problem[J]. Transportation Research B, 2002, 36(5): 421-443.
- [5] 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.
- [6] 任华玲, 高自友. 瞬时动态用户最优问题的统一模型及算法研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(7): 95-99.
REN Hua-ling, GAO Zi-you. Research on united model and algorithm of instantaneous dynamic user optimal problem [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(7): 95-99.
- [7] 任福田. 交通工程学[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.

DU Zhi-gang, PAN Xiao-dong, YANG Zhen. Research on visual turbulence and driving safety of freeway tunnel entrance and exit [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 101-105.

潘晓东, 宋永朝, 杨 轸, 等. 基于视觉负荷的公路隧道进出口环境改善范围[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 777-780.

PAN Xiao-dong, SONG Yong-chao, YANG Zhen, et al. Visual environment improving scope at entrance and exit of highway tunnel based on visual load[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(6): 777-780.

韩 颢. 山区高速公路隧道路段驾驶员眼动特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.