基于元胞传输模型的实时交通信息设计

尚华艳 黄海军 高自友

(北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100083) (北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘 要: 随着智能交通技术的发展, 可变信息标志 (VMS, Variable Message Signs)被广泛应用于动态交通管理中. 元胞传输模型 (CTM, Cell Transmission Model)可以很好地模拟交通流激波、排队形成与消散等交通流动力学特性. 提出一种新的基于 CTM 的路径行驶时间计算方法, 并使用 LOGIT 原则计算路径选择概率, 针对重复性拥挤和非重复性拥挤 2种交通状况, 分析了 VMS对交通流的影响. 数值模拟结果表明, 理论模型能够合理反映现实的交通状况: 发生重复性拥挤时, VMS能够合理疏导人们的出行, 减缓交通拥挤; 而发生非重复性拥挤时, VMS对高需求和低需求情形下的交通流影响相似, 但在高需求情形下, 路径选择对模型参数的敏感区很小.

关 键 词: 可变信息标志; 元胞传输模型; 重复性拥挤; 数值模拟

中图分类号: U 491

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008)02-0234-05

Design real-time traffic information by cell transmission model

Shang Huayan Huang Haijun

(School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Gao Ziyou

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The variable message signs (VMS) have been widely used in guiding and managing the dynamic traffic with development of intelligent transportation technologies. Such traffic dynamics as shock waves and jam can be well reproduced by cell transmission model (CTM). A new method to estimate the route travel times based on the CTM was presented and the LOGIT rule to govern the route choice was adopted. The impacts of VMS on recurrent and non-recurrent congestion were numerically investigated using the formulae proposed. The real-life traffic conditions could well be reproduced as simulation results shown. Travelers' decision making could be positively influenced by the VMS so as to alleviate the grave degree of recurrent congestion. In the case of non-recurrent congestion, the VMS induced similar effects no matter high and low the traffic demand was. However, the resultant flow pattern was sensitive within a small range of the model parameter when the demand was high.

Key words: variable message signs; cell transmission model; recurrent congestion; numerical simulations

可变信息标志 (VMS, Variable Message Signs)作为先进智能交通系统 (ATIS, Advanced Intelligent Transportation Systems)的一部分, 能够向出行者提供实时的路况信息, 诱导驾驶员做出合理的路径抉择, 达到缓解交通拥挤的目的. 近年来, 国内外专家学者针对交通系统的实时交通信息服务, 进行了大量的相关研究. 大致分为现场试验和模拟仿真 2类, 一方面寻找最佳的信息服务方式,

收稿日期: 2007-03-16

基金项目: 国家 973基础研究计划资助项目 (2006CB705503); 国家自然科学基金资助项目 (70521001); 北京航空航天大学博士研究生创新基金资助项目 (430261); 北京市科委博士生论文资助专项资金资助项目

作者简介: 尚华艳 (1978-), 女, 湖北当阳人, 博士生, shanghuayan@126.com.

如发布什么信息、发布多少信息、何时何地发布信息[1-2]; 另一方面, 对已经投入使用的各种信息服务系统进行评价, 包括技术经济效果和社会福利效果[3]. 元胞传输模型 (CTM, Cell Transmission Model)是 1994年提出的, 可以较好地模拟一些交通流动力学特性, 如激波、排队形成和消散等[4-5]. 文献[6]将 CTM 进一步扩展到网络, 给出了网络中基于 CTM 的路径时间计算方法. 文献[7]利用 CTM 研究单 OD 对网络的系统最优动态配流问题, 文献[8]应用 CTM 寻找 VMS的最佳位置. 本文研究具有 2个节点和 2条路径的简单网络, 提出一种基于 CTM 的路径行驶时间判断方法, 针对重复性拥挤和非重复性拥挤 2种交通状况, 分析了 VMS对交通流的影响.

1　模　型

考虑 2条公路并行连接生活区 O 和工作区 D, 分别构成路径 1(R_1)和路径 2(R_2); 出行者每天需要从 O 出发去工作地 D 上班. 本文做出如下假设: ①将研究时域 $[0, T]$划分为 $\overline{K}$ 个时段, 每个时段的长度为 $\Delta T = \overline{K}\Delta$, 并假设 T 足够大, 以便所有车辆能驶离路网. ②在起点 O 处设立一块可变交通信息牌, 当网络处于空静状态时, 信息牌上显示 R_1 和 R_2 的自由流运行时间. 每辆车记下进入网络的时段和离开时段, 到达 D 处时将旅行时间传输给中央处理系统. 中央系统选取各时段所有到达 D 处车辆的最小行驶时间作为该路径当时的行驶时间显示到 VMS信息牌上. 后面的出行者根据 VMS上显示的信息, 按照某种原则进行路径选择. ③假定各时段的 OD 需求已知.

1.1　元胞传输模型

如果交通流量 q 和交通密度 k 满足如图 1所示的梯形关系[4-5], 即

$$q = \min\{vk,\ q_{\max},\ \omega(k_{\text{jam}} - k)\} \qquad 0 \leqslant k \leqslant k_{\text{jam}} \tag{1}$$

则连续交通流模型的 LWR公式[9-10]可以近似离散为如下递推公式:

$$y_j(t) = \min\{n_{j-1}(t),\ Q_j(t),\ (\omega/v)(N_j(t) - n_j(t))\} \tag{2}$$

$$n_j(t+1) = n_j(t) + y_j(t) - y_{j+1}(t) \tag{3}$$

式中, v, $q_{\max}$, ω和 k_{jam}分别是车辆的自由流速度, 最大交通流量, 激波速度和堵塞密度. 路段被划分为若干相同长度的小段, 每段称为一个元胞, 其长度等于自由车流一个时间步长的行程. j代表元胞 j, $j+1$($j-1$)代表 j的下游 (上游)元胞; $n_j(t)$, $y_j(t)$, $N_j(t)$和 $Q_j(t)$分别是 t时段元胞 j内的车辆数, 车辆实际流入率, 元胞承载能力和元胞最大流入能力. 式 (2)和式 (3)给出了交通流随时间演变的更新方法.

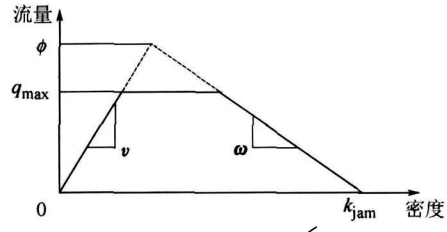


图 1　流量与密度之间的梯形关系 $\left(\phi = \dfrac{k_{\text{jam}}}{1/v + 1/\omega}\right)$

假定起点 O 是巨大的车库, 即 $N_o(t) = \infty$, 车辆流入能力 $Q_o(t)$等于 t时段网络的出行需求. 终点 D 能够接受来自路径 R_1 和 R_2 的所有车辆. 将 R_1 和 R_2 分别划分为 m_1和 m_2个元胞, 见图 2

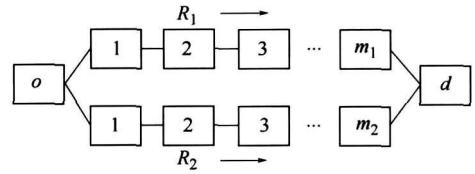


图 2　元胞示意图

将式 (3)应用到不同元胞, 有

$$\left.\begin{aligned} y_{1,1}(t) &= \beta_1(t) y_{o1}(t) \\ y_{1,2}(t) &= \beta_2(t) y_{o1}(t) \\ y_{j+1,i}(t) &= \min\{s_{j,i}(t),\ R_{j,i}(t)\} \\ y_{d,1}(t) &= s_{m_1,1}(t) \\ y_{d,2}(t) &= S_{m_2,2}(t) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中, $S_{j,i}(t) = \min\{Q_{j,i}(t),\ n_{j-1,i}(t)\}$; $R_{j,i}(t) = \min\{Q_{j,i}(t),\ \delta(N_{j,i}(t) - n_{j,i}(t))\}$; j表示第 j个元胞 (不含起点、终点); i表示第 i条路径; $\delta = \omega/v$; $\beta_1(t)$和 $\beta_2(t)$分别表示出行者选择路径 R_1 和 R_2 的概率, 显然, $\beta_1(t) + \beta_2(t) = 1$.

1.2　路径选择原则

设出行者均按照如下 LOGIT公式进行路径选择:

$$\beta_i(t) = \frac{\exp(-\theta\eta_i(t))}{\sum_{l=1}^{2}\exp(-\theta\eta_l(t))} \qquad t \in [0, T] \qquad i = 1, 2 \tag{5}$$

式中, θ是一个正的参数; $\eta_i(t)$表示时段 t信息板上路径 i的行驶时间. θ值的大小反映 VMS信息的精度和出行者对 VMS的依赖程度. θ无穷大时, 出行者选择行驶时间小的路径; θ趋于零时, 无论 2条路径的时间差异有多大, 出行者都等概率选择它们. 由于各时段 OD 需求给定, 时段 t出

发选择路径 i的车辆数等于路径 i第一个元胞的车辆流入率.

下面, 考虑如何计算 VMS显示的路径行驶时间. 因每个元胞的长度等于自由车流在一个时间步长内行走的距离, 当 $t \leqslant m_i$时, VMS显示自由流时间, 则路径 i的行驶时间等于其元胞总数. 当 $t > m_i$时, 若时段 t出发的车辆在时段 w 离开路径, 令 $c_i(w)$表示信息板上 w 时段所显示的路径 i, 则需要考虑 2种情形:

① 若 $m_1 = m_2 = m$, 有

$$\left.\begin{aligned} \eta_1(t) &= \eta_2(t) = m \quad t \leqslant m \\ \eta_1(t) &= c_1(w) \quad t > m \\ \eta_2(t) &= c_2(w) \quad t > m \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

② 若 $m_1 \neq m_2$, 不妨设 $m_1 > m_2$, 有

$$\left.\begin{aligned} \eta_1(t) &= m_1 \quad t \leqslant m_2 \\ \eta_2(t) &= m_2 \quad t \leqslant m_2 \\ \eta_1(t) &= m_1 \quad m_2 < t \leqslant m_1 \\ \eta_2(t) &= c_2(w) \quad m_2 < t \leqslant m_1 \\ \eta_1(t) &= c_1(w) \quad t > m_1 \\ \eta_2(t) &= c_2(w) \quad t > m_1 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

为便于描述, 代表路径的下标 $i = 1, 2$在下文中被省略. 设时段序列 $\overline{T} = \{1, 2, \cdots, t, \cdots, \overline{K}\}$ 表示车辆在起点出发的时段; $u(t)$, $t \in \overline{T}$表示 t时段出发的车流量; $U(t)$, $t \in \overline{T}$表示至时段 t累计出发的车流量 $U(t) = \sum_{l=1}^{t} u(l)$. 时段序列 $W = \{m, m+1, \cdots, w, \cdots, \overline{K}\}$ 表示车辆到达终点的时段; $v(w)$, $w \in W$ 表示 w 时段到达终点的车流量; $V(w)$, $w \in W$ 表示至时段 w 累计到达终点的车流量 $V(w) = \sum_{l}^{w} u(l)$.

时间离散化后, 不能保证同一时段 t出发的车辆 $u(t)$将在同一时段 w 到达终点 D[8]. 同理, 也不能保证同一时段 w 到达终点的车辆 $v(w)$都是在同一时段 t出发的. 离散化后的起点出发量和终点流出量存在关系: ①同一时段出发的车辆 $u(t)$在同一时段 w 到达终点元胞 d, 即 $u(t) = v(t + c(w))$; ②同一时段出发的车辆 $u(t)$在 $x(x > 1)$个时段里进入终点元胞 d, 即 $u(t) = v(t + c(w)) + v(t + c(w) + 1) + \cdots + v(t + c(w) + x)$; ③$x(x > 1)$个时段内出发的车辆在同一时段进入终点元胞 d, 即 $u(t) + u(t+1) \cdots + u(t+x) = v(t + x + c(w))$.

因此, 根据 $U(t)$和 $V(w)$的关系, 在时段 w, 信息板上的路径行驶时间 $c(w)$可以表示为

$$c(w) = \begin{cases} w - t & V(w) = U(t) \\ w - t & V(w) < U(t) < V(w+1) \\ l - t & V(w+x) < U(t) \quad l = w \\ & w+1 \cdots, w+x \\ w - (t+1) & \\ & U(t) < V(w) < U(t+1) \\ w - (t+x+1) & \\ & U(t+x) < V(w) < U(t+x+1) \end{cases} \tag{8}$$

式中, $V(w) = U(t)$, 说明无论是否有 $t-1$, $t-2$, …, 1时段的车辆在时段 w 进入终点, 同一时段 t出发的车辆 $u(t)$在同一时段 w 到达终点; $V(w) < U(t) < V(w+1)$表明, 时段 t出发的车辆, 一部分在时段 w, 一部分在时段 $w+1$进入终点元胞 d; $V(w) < U(t)$, $V(w+1) < U(t)$, …, $V(w+x) < U(t)$意味着, 同一时段出发的车辆 $u(t)$在 $x(x > 1)$时段内进入 d; $U(t) < V(w) < U(t+1)$则说明, 时段 $t+1$出发的车辆部分在时段 w, 部分在时段 $w+1$进入 d; $U(t+x) < V(w) < U(t+x+1)$意味着, $x(x > 1)$个时段内出发的车辆在同一时段进入 d.

2 模拟结果

交通拥挤可以分为重复性拥挤 (recurrent congestion)和非重复性拥挤 (non-recurrent congestion). 前者是因需求大于供给导致的可预见性拥挤, 如早晚高峰期的交通流, 后者则因事故等例外情况导致通行能力下降, 诱发的交通阻塞[3]. 为了判断理论模型是否合理反映现实的交通状况, 针对这两种拥挤情形, 分析了 VMS对交通流的影响.

2.1 VMS对重复性拥挤交通流的影响

算例 **1** 假定所有路段上的流量—密度关系均满足图 1所示的梯形基本图, 研究时域为 3 600 s, 离散成 720个时段. 路段的最大通行能力为 0.5辆/(s×车道), 堵塞密度为 0.125辆/m, 自由流车速为 13.3 m/s, 交通激波的后向传播速度为 7.9 m/s. 2条路段均为单车道, 式(5)中的 θ 取值 0.1, 给定的交通需求如图 3所示.

每条路径的元胞数目反映了它的几何长度, 算例 1假定 R_1比 R_2长. 图 4分析了当路径 R_1上的元胞数 m_1分别为 20, 40, 60, 80, 100(相应地, R_2上的元胞数 m_2分别为 15, 30, 45, 60, 75)时, 选择路径 R_1的车辆数目的变化. 可以看出, 选择 R_1的车辆数始终总是比选择 R_2的车辆数少. 对于较短

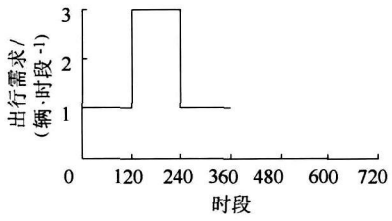


图 3　研究时域内总的出行需求

路径的情形 (m_1 = 20, 40, 60), 出行者能够实时地响应需求变化, 做出正确的路径选择. 但是, 当 m_1 = 80和 m_1 = 100时, 选择 R_1 的车辆数在 t = 210左右开始上扬, 并没有在 t = 240时回落到应有的值. 这说明, 由于路径较长, 中央处理系统在某时段于终点处获得的路径时间不能真实反映该时段进入路径的车辆将要经历的时间, 一定程度上误导了出行者. 不过, 现实中城市道路的不间断长度一般不会超过 4 000 m, 即 $m_1 \leqslant 60$ 因此, 在VMS支持下, 出行需求可以被合理分配, 达到减缓交通拥挤的目的.

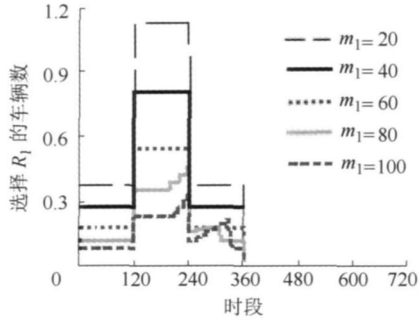


图 4　选择路径 R_1 的车辆数

2 2　VMS对非重复拥挤交通流的影响

算例 **2**　其中参数与算例 1基本相同, 但为了突出事故的影响, 假定 2条路径的长度相同, 均为 60个元胞. 考虑在第 600 s时, 路径 R_2 的第 50个元胞上发生交通事故, 该元胞的流入能力立即变为 0, 900 s后事故处理完毕. 算例 2研究了高需求和低需求 2种情形: 高需求时, 研究时域的前 1 800 s交通需求是每时段 3辆车, 其它时段的需求为 0; 低需求时, 前 1 800 s交通需求是每时段 1辆车, 其它时段的需求为 0

图 5给出了高需求情形下路径 R_1 和 R_2 上车流的时空轨迹. 开始时, 车辆等概率地选择 R_1 和 R_2. 事故发生后, R_2 上的车辆逐渐接近元胞的承载能力, 形成排队, 使 R_2 的行驶时间超过 R_1. 后出发的车辆根据 VMS信息调整路径, 导致 R_1 上的车辆数目大幅增加, 但车流仍相对稳定, 如图 5a所示. 图 5b中可以清楚地看到排队的形成、消散过程以及交通激波的产生. 在第 600 s(第 120时段), 排队在第 50个元胞上出现, 其尾部向后传播直至第 30个元胞; 在第 150时段至第 320时段, R_2 的第一个元胞内一直没有车辆, 说明这段时间内车辆都转向 R_1; 当事故解除后, 部分车辆回到 R_2. 我们注意到, 虽然事故在第 300时段解除, 但车辆需要等到第 320时段才选择 R_2, 因为 R_2 上排队的消散需要一些时间. 另外, 由于元胞流入能力的限制和过多的车辆转向路径 R_1, 部分车辆在起点 O 处排队等候.

图 6演示了低需求时路径 R_2 上车流的时空轨迹. 可以看出, 事故对交通流的时空影响与高需求时基本相似, 但选择 R_1 的车辆不会受到元胞流入能力的限制, 都能够顺利地流入和流出网络.

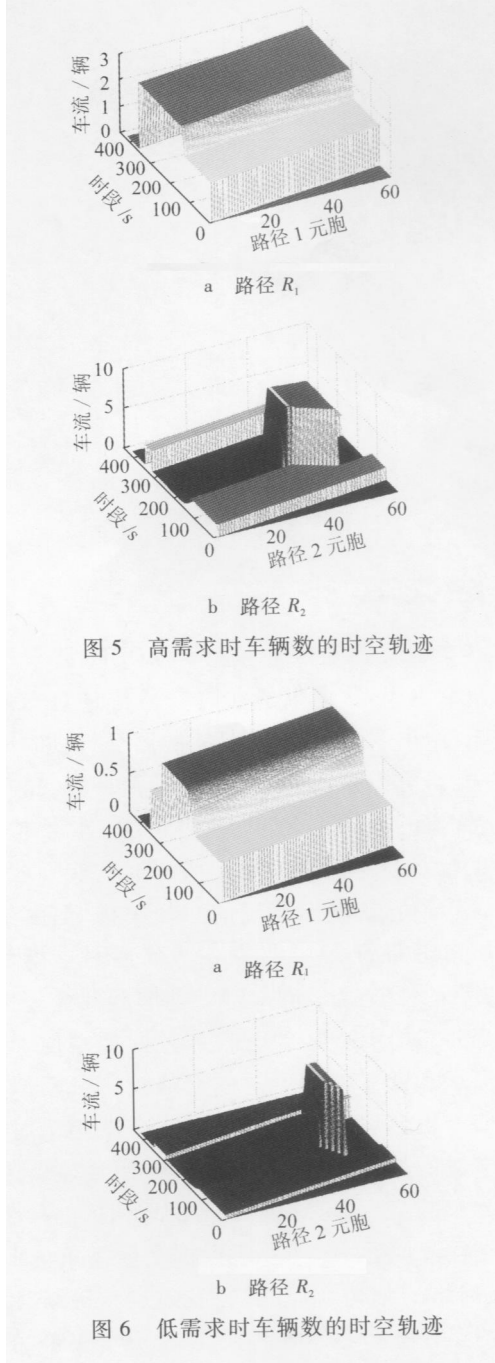
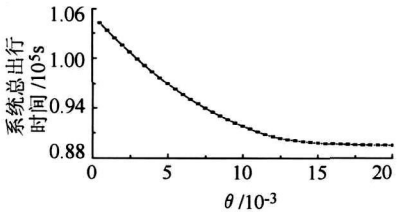


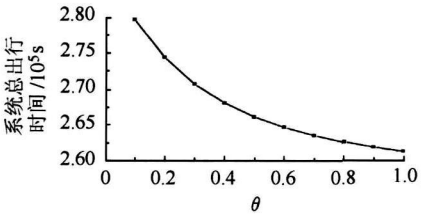
图 5　高需求时车辆数的时空轨迹

图 6　低需求时车辆数的时空轨迹

最后,分析路径选择公式中参数 θ对交通系统总出行时间的影响,系统总出行时间的计算方法参见文献[8]. 图 7显示了高需求和低需求时系统总出行时间与 θ值的关系. 随着 θ值增加,总时间减小,这符合 LOGⅡ模型的原理. 高需求情形下,当 θ值大于 0.02时,总时间已经趋于稳定;而低需求情形下 θ值为 0.1时,总时间还在继续下降. 这说明,高需求情形下,影响流量分布的模型参数取值区间很小. 这是因为两条路径的行驶时间都很大,尽管 θ值很小,出行者依然能够清楚地理解路径时间的差别.



a 高需求



b 低需求

图 7 高需求和低需求时不同 θ值对系统总出行时间的影响

3 结束语

本文利用元胞传输模型和 LOGⅡ路径选择原则研究由 VMS提供的实时交通信息对交通流的影响,给出了一种基于 CTM 的路径行驶时间计算方法. 研究发现,当发生重复性拥挤时,路径长度对 VMS的效果存在一定的影响. 路径越长,VMS的信息越不能真实地反映当时的交通状况,出行者越不容易做出正确的路径抉择. 但由于现实中城市道路的长度有限,信息滞后对本模型的影响并不十分显著,所以 VMS能够起到合理指导人们出行的作用. 当出现非重复性拥挤时,VMS对高需求和低需求情形下的交通流影响相似,模型能够产生合理的交通流时空图,但高需求时,未发生事故的路径上容易出现排队,而且显著影响流量分布的路径选择模型参数的取值区间很小.

在实际问题中,还需要根据交通需求的时空特征、网络的结构、事故的频发地点和持续时间、司机的路径选择习惯等因素,综合分析 VMS的影响. 本文的路径时间计算方法,可以嵌入动态交通分配模型中.

参考文献 (References)

[1] Wang W X, Wang B H, Zheng W C, et al. Advanced information feedback in intelligent traffic systems[J]. Physical Review E, 2005, 72: 66702

[2] Wahle J, Bazzan A L C, Klügl F, et al. Decision dynamics in a traffic scenario[J]. Physica A, 2000, 287: 669-681

[3] Lam W H K, Chan K S. A model for assessing the effects of dynamics travel time information via variable message signs[J]. Transportation, 2001, 28: 79-99

[4] Daganzo C F. The cell transmission model: a simple dynamic representation of highway traffic[J]. Transportation Research Part B, 1994, 28(4): 269-287

[5] Daganzo C F. The cell transmission model part II: network traffic[J]. Transportation Research Part B, 1995, 29(2): 79-93

[6] Lo H K, Szeto W Y. A cell-based variational inequality formulation of the dynamic user optimal assignment problem[J]. Transportation Research Part B, 2002, 36(5): 421-443

[7] Ziliaskopoulos A K. A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem[J]. Transportation Science, 2000, 34(1): 37-49

[8] 尚华艳,黄海军,高自友. 基于元胞传输模型的可变信息标志选址问题研究[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4342-4347
Shang Huayan, Huang Haijun, Gao Ziyou. Locating the variable message signs by cell transmission model[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4342-4347(in Chinese)

[9] Lighthill M J, Whitham G B. On kinematic waves: a theory of traffic flow on long crowded roads[J]. Proceedings of Royal Society Series A, 1955, 22: 317-345

[10] Richards P I. Shock waves on the highway[J]. Operations Research, 1956, 4: 42-51

[11] 陈德旺,关积珍,朱雪良. 基于占有率的交通流参数模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(5): 83-86
Chen Dewang, Guan Jizhen, Zhu Xueliang. Research on traffic flow models based on occupancy[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(5): 83~86 (in Chinese)

[12] 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
Gao Ziyou, Ren Hualing. Dynamic traffic assignment problems in Urban transportation networks: models and methods[M]. Beijing: Peoples Transportation and Communication Press, 2005 (in Chinese)

[13] 王力,王川久,沈晓蓉,等. 基于模糊旅行时间的动态交通分配模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1149-1152
Wang Li, Wang Chuanjiu, Shen Xiaorong, et al. Dynamic traffic assignment model based on fuzzy travel time[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(10): 1149-1152 (in Chinese)

(责任编辑:卢 硕)