

文章编号:1671-8879(2010)05-0075-04

交通错峰出行策略仿真模型

袁绍欣,赵祥模,刘占文,安毅生

(长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了表征实行弹性工作起始时间的车流在交通高峰时段内的路网旅行成本,并得到路网车流的最优错峰出行策略,提出了交通错峰出行2层模型。模型上层负责对路网车流出行策略集合进行遍历,模型下层针对上层的每个出行策略,采用基于离散随机网络的动态交通流分配方法,仿真车流在路网中的并发路由及出发时间均衡特性,求出路网车流交通旅行总成本,策略集合遍历结束后就可确定最优错峰出行策略。模型仿真揭示了影响最优策略选择结果的主要因素,给出了特定条件下最优策略选择方向上的变化规律,可为制定城市路网错峰出行政策提供参考。

关键词:交通工程;错峰出行;随机动态并发路由及出发时间均衡;旅行成本;弹性工作起始时间

中图分类号:U491

文献标志码:A

Simulation model of travel strategies for staggered shifts

YUAN Shao-xin, ZHAO Xiang-mo, LIU Zhan-wen, AN Yi-sheng

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To represent the travel cost of traffic of implementing the flexible work-start time in networks during the rush hour, and then to obtain the optimal travel strategy of staggered shifts, a traffic staggered-shifts two-level model is proposed, in which the upper-level is to traverse a set of strategies, and the lower-level, thus according to the each strategy determined by the upper-level, via the theory for dynamic traffic assignment of discrete stochastic network, is to simulate the vehicle-driving features of stochastic dynamic simultaneous route/departure time equilibrium, and the total travel cost is calculated. When the traversal of the set of the strategies is finished, the optimal strategy is hence determined. The simulation not only reveals the primary factors affecting the selected results of the optimal strategy, but also reveals the changing law of selected directions of the optimal strategy under certain conditions, which can be of reference values for making urban transportation regulations of staggered shifts. 3 tabs, 4 figs, 9 refs.

Key words: traffic engineering; staggered shifts; stochastic dynamic simultaneous route/departure time equilibrium; travel cost; flexible work-start time

0 引言

道路系统在上班时承受了较大的压力,由此

引发的环境污染不断加剧、时间延误等交通旅行成本也急速增加。让路网交通流在时空上和谐起来,是解决上述问题的重要思路,而其中的重要举措,即

收稿日期:2009-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50978030);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-05-0849)

作者简介:袁绍欣(1972-),男,辽宁黑山人,讲师,工学博士研究生,E-mail:shxyuan@chd.edu.cn.

调整路网中不同起讫点对车流的工作起始时间,在形成的多个错峰出行策略中,寻找使路网交通旅行总成本最低的、也是最优的出行策略,已为交通规划者重点关注。以往的研究成果,诸如弹性工作时间可优化交通流在路网中的旅行成本;交通流在路网中的动态装载;交通流出发时间及动态路由均衡等,都是从交通旅行成本角度出发,为研究交通流错峰出行优化策略奠定了基础^[1-8]。本文提出的交通错峰出行模型结构分为 2 个层次,上层对路网出行策略集合进行遍历;下层针对上层的每个出行策略,采用基于离散随机网络的动态交通流分配方法,仿真车流在路网中的并发路由及出发时间均衡特性,求出车流在路网中的交通旅行总成本,策略集合遍历结束后,最优错峰出行策略就可确定下来^[9]。

1 问题陈述

考虑路网 $G: G = (N, A)$, N 为结点集合; A 为路段集合。 G 中的起讫对 (r, s) 构成一个集合 L , 即 $(r, s) \in L = \{(r, s) \mid r \in R \subset N; s \in S \subset N\}$ 。其中: R 为起点集合; S 为终点集合; r 为起点; s 为终点。每个 (r, s) 拥有相应的交通需求量以及弹性工作起始时间。调整 L 中各 (r, s) 的工作起始时间,必然会影响车流在路网 G 中的交通旅行总成本,而使总成本最低的各 (r, s) 对工作起始时间的组合,就是错峰出行的求解优化目标;另外,驾驶人出行时,总是选择成本最低的出发时间和路线,多数驾驶人类似选择的最终结果,就会使路网在出行时间和路线上具有交通旅行成本均衡的演变特性。

2 模型的形式化

2.1 模型下层的形式化

离散随机网络表达车流在路网 G 中演变的含义是: 车流在 G 中的行驶时间被分成了以 δ 为单位的 k 个时段 ($k = 0, 1, 2, \dots$); 驾驶人选择的出行时间和路线的实际成本与理解成本之间存在误差,其主要参量定义见表 1。

这些参量具有如下关系

$$u_{ap}^n(k) = \begin{cases} f_p^n(k) & \text{如果 } a \text{ 为路径 } p \text{ 的起始路段} \\ v_{bp}^n(k) & \text{如果 } b \text{ 为路段 } a \text{ 的前一路段} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_a^n(k) = U_a^n(k) - V_a^n(k) \quad (2)$$

$$t_a(k) = \tau[x_a^n(k)] \quad (3)$$

$$U_a^n(k) = U_a^n(k-1) + \sum_n \sum_p u_{ap}^n(k) \delta \quad (4)$$

表 1 主要参量及其含义

符号	含义
$u_{ap}^n(k)$	起点 r 、终点 s 之间路径 p (下同) 上的路段 a 在 k 时刻的人口流量
$v_{bp}^n(k)$	路段 a 在 k 时刻的出口流量
$x_a^n(k)$	路段 a 在 k 时刻的车辆数
$U_a^n(k)$	路段 a 在 k 时刻的累计流入车辆数
$V_a^n(k)$	路段 a 在 k 时刻的累计流出车辆数
$V_{ap}^n(k)$	r, s 之间路径 p 上的路段 a 在 k 时刻的累计流出车辆数
$t_a(k)$	k 时刻进入路段 a 的车辆旅行时间
$f_p^n(k)$	路径 p 在 k 时刻的出发流量
$t_p^n(k)$	k 时刻出发流量在路径 p 上的旅行时间
$c_p^n(k)$	k 时刻出发流量在路径 p 上实际旅行成本
$c_p^n(k)'$	k 时刻出发流量在路径 p 上理解旅行成本

$$V_{ap}^n(k) = V_{ap}^n(k-1) +$$

$$\sum_{j \in \{j \mid (k-1)\delta < t_{aj} + t_{aj}(j) < k\delta\}} u_{ap}^n(j) \delta \quad (5)$$

$$V_a^n(k) = \sum_n \sum_p V_{ap}^n(k) \quad (6)$$

$$v_{ap}^n(k) = (V_{ap}^n(k) - V_{ap}^n(k-1)) / \delta \quad (7)$$

式(3)中的 τ 表示一种函数关系。

上述参量具有的初始状态为

$$u_{ap}^n(0) = 0, v_{bp}^n(0) = 0, x_a^n(0) = 0$$

$$U_a^n(0) = 0, V_a^n(0) = 0 \quad (8)$$

车流路径旅行时间为

$$t_p^n(k) = t_{a1}(k) + t_{a2}(k + t_{a1}(k)) + \dots + t_{am}(k + t_{a1}(k) + \dots + t_{a(m-1)}(k)) \quad (9)$$

式中: $p = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 。根据路径旅行时间可以得到路径实际旅行成本为

$$c_p^n(k) = \alpha_p^n(k) + F_1 + F_2 \quad (10)$$

$$F_1 = \begin{cases} \beta[t_i^n - \Delta_i - k - t_p^n(k)] & \text{if } t_i^n - \Delta_i > k + t_p^n(k) \\ \gamma[k + t_p^n(k) - t_i^n - \Delta_i] & \text{if } t_i^n - \Delta_i < k + t_p^n(k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

式中: F_1 为车流的惩罚费用; t_i^n 为 (r, s) 的工作起始时间; $[t_i^n - \Delta_i, t_i^n + \Delta_i]$ 为车流到达终点的期望时间间隔; $t_i^n - \Delta_i$ 为最早期望到达时间; $t_i^n + \Delta_i$ 为最晚期望到达时间; α 为将旅行时间转为旅行成本的一个常数; β, γ 分别为车流早到与晚到的惩罚系数, 一般它们的关系为 $\gamma > \alpha > \beta$; F_2 为因工作起始时间调整应付出的社会成本函数。

$$F_2 = f(t_i^n - t_{\min}^n), t_{\min}^n = \min\{t_i^n\} \quad (12)$$

随机网络的理解成本和实际成本的关系为

$$c_p^n(k)' = c_p^n(k) + \xi, \xi = \ln(f_p^n(k)) / y \quad (13)$$

式中: ξ 为旅行成本的理解误差; y 为车流对路网的

熟悉程度。

对于任一 (r, s) 车流,理解成本具有的特点为

$$\left. \begin{aligned} c_p^n(k)' &= \pi_{\min}^n & \text{如果 } f_p^n(k) > 0 \\ c_p^n(k)' &> \pi_{\min}^n & \text{如果 } f_p^n(k) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: $\pi_{\min}^n = \min\{c_p^n(k)'\}$,即任一时间出发的车流,都选择它们理解的最小成本路线;不是最小成本的路线都没有车流。

这样选择的结果是,有车流的路线其理解旅行成本都一致。这种关系又可表示为

$$f_p^n(k) = \frac{\exp(-\gamma c_p^n(k)')}{\sum_p \sum_k \exp(-\gamma c_p^n(k)')} q^n \quad (15)$$

式中: q^n 为 r 与 s 之间的交通需求量,它具有式(16)的约束关系,即

$$\sum_p \sum_k f_p^n(k) \delta = q^n \quad (16)$$

2.2 模型上层的形式化

在集合 L 中,对于 $\forall rs$,其工作起始时间 t_s^n 可离散取值为: $t_s^n \in T(r, s) = \{t_{\min}^n \leq l \delta \leq t_{\max}^n, l \in N^+\}$;各 (r, s) 的 t_s^n 构成向量 t_s^{n*} ,用于表示出行策略; Ω 为策略集合: $\Omega = T(r, s)_1 \times T(r, s)_2 \times \dots \times T(r, s)_n$;其中,乘号 \times 为笛卡尔乘积; t_s^{n*} 为最优策略,它具有式(17)所示的关系,即

$$\min Z(t_s^{n*}) = Z(t_s^{n*}) = \sum_n \sum_p \sum_k f_p^n(k) c_p^n(k) \quad (17)$$

3 算法

(1) 初始化。建立路网图,得到 L 集合,集合 L 遍历中的每个 (r, s) ,得到相应的路径。

(2) 对 Ω 策略集合进行遍历。对于集合中的任意一策略,确定每个 (r, s) 的出发时间段以及进行 $f_p^n(k)$ 的初次分配。如集合遍历结束,转到(4)。

(3) 递归迭代分配路网中各路径的出发流量:

① 根据 $f_p^n(k)_t$,执行动态网络装载得到 $t_p^n(k)_t$,并依次计算出 $c_p^n(k)_t$ 、 $c_p^n(k)_t'$ (t 为迭代次数);

② 根据式(15)计算得到 $f_p^n(k)_t'$;

$$\textcircled{3} f_p^n(k)_{t+1} = f_p^n(k)_t + \frac{f_p^n(k)_t' - f_p^n(k)_t}{t};$$

④ 如果 $\sum_n \sum_p \sum_k |f_p^n(k)_{t+1} - f_p^n(k)_t| / q^n \leq \epsilon$ 为真转到(2),否则 $t = t + 1$ 转到①。

(4) 得到 t_s^{n*} 并输出。

4 算例

现以图1所示的路网为例,说明模型及算法的

应用。车流的路段旅行时间函数为

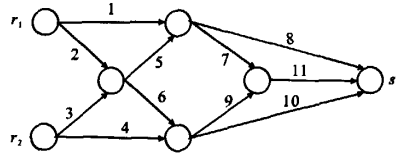
$$t_a(k) = \tau[x_a^n(k)] = \varphi_a + \lambda_a x_a^n(k) \quad (18)$$

式中: φ_a 为路段的自由旅行时间; λ_a 为影响 $x_a^n(k)$ 旅行时间的一个参数。

路网中各路段的参数如表2所示。其他参数为: $\delta = 0.6 \text{ min}$; $\gamma = 9$; $\alpha = 6.4$; $\beta = 4.9$; $\epsilon = 0.0001$; $\Delta_s = 0.18 \text{ h}$ 。路网中 (r_1, s) 与 (r_2, s) 的交通需求量分别设为 $q_1 = q_1' = 5000 \text{ veh}$, $q_2 = q_2' = 5500 \text{ veh}$ 。车流的最早出发时间设为6:00,弹性工作起始时间区间为 $[8:00, 8:30]$,出发时间段为 $[6:00, t_s^n - 0.8]$; F_2 函数设为

$$F_2 = w(t_s^n - t_{\min}^n) \quad (19)$$

式中: w 为参数。



路径1为1,7,11;路径2为1,8;路径3为2,5,7,11;
路径4为2,6,9,11;路径5为2,6,10;路径6为2,5,8;
路径7为4,10;路径8为3,5,7,11;路径9为4,9,11;
路径10为3,5,8;路径11为3,6,10;路径12为3,6,9,11

图1 样本路网

表2 路网参数

路段	φ_a/h	λ_a
1	0.30	0.00035
2	0.15	0.00025
3	0.15	0.00025
4	0.30	0.00030
5	0.20	0.00035
6	0.20	0.00020
7	0.20	0.00020
8	0.40	0.00045
9	0.20	0.00025
10	0.50	0.00035
11	0.20	0.00025

下页表3为 (r_1, s) 与 (r_2, s) 组成的出行策略集合 Ω 。下页图2则给出了对应集合中每个策略的旅行总成本仿真结果。图2中,■1表示各出行策略集合中序号1的策略,如1A,1B,...,1F;其他依此类推。图2参数中,错峰效果最好的策略是6A,而其他策略,例如将 (r_1, s) 与 (r_2, s) 工作起始时间都向后调整,虽然可以明显降低旅行总成本,但都不是最优效果。

从图2可以看出,从1A到6F的组策略的分布具有一定的规律性:即组策略单调递减。这里的策略

表 3 (r_1, s) 与 (r_2, s) 组成的出行策略集合

时刻		(r_1, s)					
		8:00	8:06	8:12	8:18	8:24	8:30
(r_2, s)	8:00	1A	1B	1C	1D	1E	1F
	8:06	2A	2B	2C	2D	2E	2F
	8:12	3A	3B	3C	3D	3E	3F
	8:18	4A	4B	4C	4D	4E	4F
	8:24	5A	5B	5C	5D	5E	5F
	8:30	6A	6B	6C	6D	6E	6F

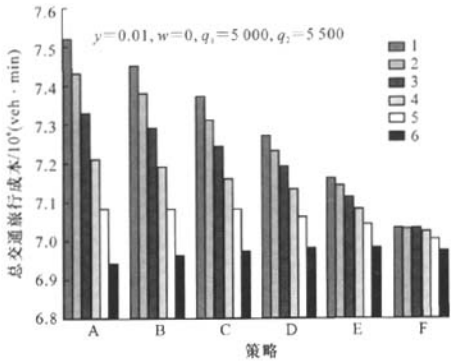


图 2 表 3 中各出行策略的仿真结果

分组方法是:对应于 (r_1, s) 的每个固定工作起始时间,向后调整 (r_2, s) 的工作起始时间而形成的一组策略。具有这种规律性的原因是, (r_2, s) 交通需求量对样本路网旅行总成本的贡献比重较大。因此,若存在 (r_3, s) ,且它对总成本的贡献小于前二者,则最优策略应在 $\{6A, 6B, 6C, 6D, 6E, 6F\} \times T(r_3, s)$ 当中。由此可得出这样的经验规则:如果一个样本网络具有 n 个 (r, s) 对,可分别求得它们在样本网络中的旅行成本并进行排序,得到 $\{c_{r_j}^s \mid c_{r_1}^s > c_{r_2}^s > \dots > c_{r_n}^s\}$,之后先对 $(r, s)_n, (r, s)_{n-1}$ 进行错峰优化,再将 $(r, s)_{n-2}$ 引入样本路网,此时优化策略应存在于 $D \times T(r, s)_{n-2}$ 当中,这里的 D 为集合,集合中的每个元素为 $(r, s)_n$ 与 $(r, s)_{n-1}$ 的每组策略中的最优策略。从而可见,组策略单调递减性会将算法搜索时间复杂度从 m^n 降为 m^{n-1} ,其中, $n \geq 2, m$ 为每 (r, s) 对具有的工作起始时间离散数。

需要说明的是,组策略单调递减性在一些条件下是可改变的。如当 F_2 成本不能忽略时,如图 3 所示;另外,当样本路网中某 (r, s) 对拥有较大的交通需求量($q_1 = 1\,000\text{ veh}, q_2 = 7\,500\text{ veh}$)时,并且这些交通量在路网中的分布又不均匀,即参数 y 由 0.01 到 0.1, 组策略单调递减性也会如图 4 所示那

样被改变。

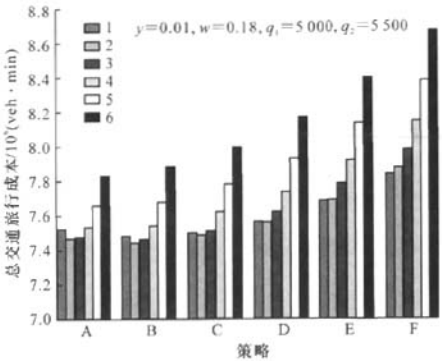


图 3 F_2 函数对组策略单调性的影响

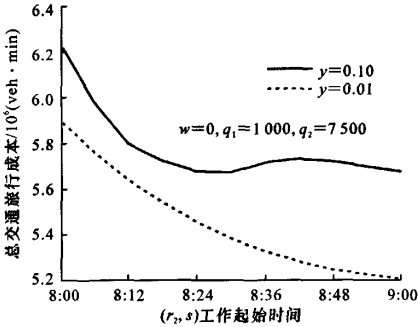


图 4 参数 y 对组策略单调性的影响

5 结 语

- (1)错峰出行优化策略的选择结果除与路网各起讫点对工作起始时间设置直接相关外,还与交通需求、路网参数、错时社会成本、车流对路网熟悉程度等因素密切相关。
- (2)当研究的路网有组策略单调递减的规律时,模型算法的时间复杂度将会降低,这为大规模实际交通路网求解错峰出行优化策略指明了搜索方向。
- (3)模型以上班为例来说明错峰出行优化策略的确定过程,但相应方法同样适用于下班以及特定时刻求解路网错峰出行优化策略。
- (4)模型的仿真结果可为交通规划人员制定城市路网错峰出行政策提供参考。

参考文献:

References:
[1] Li S G. Determination of optimal work start time[J]. Transport, 2007, 22(1): 45-49.

的观察中也表明了各种交通堵塞现象的存在。

(2)为再现交通堵塞现象,开发了交通模拟模型,并通过模拟表明多模式交通堵塞现象的存在。

(3)高速公路合流部的交通现象,因匝道车辆的合流行为而异常复杂,提出的换道模型能够解释、分析并再现时刻变化的合流部交通现象,为缓和合流部交通堵塞现象提供了理论依据。

参考文献:

References:

- [1] 大口敬. 高速道路单路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望[C]//日本土木学会. 日本土木学会論文集. 东京:日本土木学会,2000:39-51.
- [2] 王晓原,邢 丽. 机非混行环境下驾驶员行为建模及仿真[J]. 中国公路学报,2009,22(2):98-104.
WANG Xiao-yuan, XING Li. Modeling and simulation for driving behavior in mix-traffic environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2):98-104.
- [3] 王晓原,杨新月. 驾驶行为非参数微观仿真模型[J]. 交通运输工程学报,2007,7(1):76-80.
WANG Xiao-yuan, YANG Xin-yue. Nonparametric microscopic simulation model of driving behavior[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007,7(1):76-80.
- [4] Helbing D, Hennecke A, Shvetsov V, et al. Micro-and

macro-simulation of freeway traffic[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 35(5):517-547.

- [5] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Derivation, properties and simulation of a gas-kinetic-based nonlocal traffic model[J]. Physical Review E, 1999, 59(1):239-253.
- [6] Helbing D. High-fidelity macroscopic traffic equations[J]. Physica A, 1995, 219:391-407.
- [7] Kerner B S, Rehborn H. Experimental properties of phase transitions in traffic flow[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(20):4030-4033.
- [8] Chandler R E, Herman R, Montroll E W. Traffic dynamics; studies in car following [J]. Operations Research, 1958, 6(2):165-184.
- [9] Newell G F. Nonlinear effects in the dynamic of car follow[J]. Operations Research, 1961, 9(2):209-229.
- [10] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congest traffic state in empirical observations and microscopic simulation[J]. Physical Review E, 2000, 62:1805-1824.
- [11] Peter H. Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving[J]. Transportation Research: Part C, 2005, 13:63-74.
- [12] 王興拳, 宮城俊彦. 渋滞波及現象モデルによるオンランプ区間での混雑現象分析[C]//日本交通工学研究会. 交通工学研究発表会論文報告集. 东京:日本交通工学研究会, 2006:29-32.

(上接第78页)

- [2] Yoshimura M, Okumura M. Optimal commuting and work start time distribution under flexible work hours system on motor commuting[J]. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2001, 3(2):455-469.
- [3] Rubio A J M, Wu J H, Florian M. Two improved numerical algorithms for the continuous dynamic network loading problem[J]. Transportation Research: Part B, 2003, 37(2):171-190.
- [4] Chabini I. Analytical dynamic network loading problem: formulation, solution algorithms, and computer implementations[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1771(24):191-200.
- [5] David W. User equilibrium traffic network assignment with stochastic travel times and late arrival penalty[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(3):1539-1556.
- [6] Friesz T L, Mookherjee R. Solving the dynamic net-

work user equilibrium problem with state-dependent time shifts [J]. Transportation Research: Part B, 2006, 40(3):207-229.

- [7] 史 峰, 罗端高. 降级路网的多类用户均衡分配模型及求解算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(4):70-76.
SHI Feng, LUO Duan-gao. Model and solution algorithm for multiclass user equilibrium assignment problem in degradable road network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(4):70-76.
- [8] 杨晓光, 褚浩然. 错峰出行对城市交通影响分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(7):899-903.
YANG Xiao-guang, CHU Hao-ran. Study on macro-travel impact analysis of staggered shifts[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(7):899-903.
- [9] 陆化普, 黄海军. 交通规划理论前沿研究[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.