

基于元胞自动机的基本路段行程时间研究

祁宏生, 宋现敏, 王殿海, 郭伟伟

(吉林大学 交通学院, 长春 130022)

摘要: 以城市基本路段上的行程时间为研究对象,研究了多车道、含渠化区、信号控制影响下的行程时间. 通过对驾驶员基本移动规则、换道特性、信号控制反应的描述,基于 NaSch 模型建立了基本路段上的元胞自动机模型 CAUB,并利用 CAUB 对行程时间进行了研究. 结果表明,基本路段上的行程时间与流量和信号设置有关,也同转向流量比例有关,且呈现突变的特性.

关键词: 交通工程; 行程时间; 元胞自动机; 换道行为

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)10-1517-07

行程时间是路网运行畅通与否的重要指标之一,与出行者的感受密切相关,可以为管理部门提供基础决策信息. 针对行程时间学界展开了大量的研究,应用最广泛的行程时间函数是美国公路局 BPR 模型,该模型将行程时间函数表达为流量的增函数,随后一些学者从道路结构形式、交通流结构^[1]等对其进行修正,但仅适用于静态条件(即流量输入不变情况),不适合动态分析. 由于动态交通分配理论和 ATIS 应用的发展,一些学者研究了动态条件下的行程时间并对之进行了估计. 在行程时间函数方面,学者们一直寻求将行程时间表达成路段交通参量的函数, Friesz 等^[2]最早提出动态交通分配框架中应用的行程时间是路段上车辆数的函数; Ran 等^[3]提出了随机型和确定型情况下的行程时间模型,并讨论了表征行程时间的最少变量,认为利用车辆数、流入率、流出率是分析行程时间函数的必须变量; Daganzo^[4]通过推导认为行程时间是车辆数的增函数,与流入率、流出率无关;在此基础上, Carey 等^[5]提出进入路段车辆的行程时间是进入路段时刻流入率和驶离路段时流出率加权加的函数,且满足“先进先出”规则、流量恒定时趋向于静态行程时间函数(即 BPR 函数)等;在行程时间估计方面,学者们通过图像识别、自动车辆识别等手段^[6],利用交通流理论^[7]、数理统计(如马尔科夫链^[8]等)等方法对行程时间进行估计,产生了一系列成果.

现有行程时间研究大多是针对高速公路. 在城市路网中,一般路段(本文为“基本路段”)存在着渠化区、信号设置、内部交通流出入等更为复杂的特点,且由于网络结构特性,交通流存在着大量不同于高速公路上以效率为主的换道行为,因此,现有研究成果无法对城市路网基本路段的行程时间特性进行分析. 元胞自动机是微观模型的一种,近年来在交通中得到广泛的应用,本文以元胞自动机为分析方法,建立城市路网基本路段的元胞模型 CAUB(cellular automata model of urban basic road),对其行程时间特性进行分析.

1 城市基本路段元胞模型

为了对基本路段上的行程时间进行分析,首先需要建立基本路段上的元胞自动机模型. 现有元胞模型大多针对某一具体问题(例如换道行为、单车道上的跟驰行为等)进行研究,基本路段上的驾驶员行为更加复杂,除了基本的跟驰行为外,还涉及换道、对信号控制的反应等. 作者考虑基本跟驰行为、换道行为、对信号控制的反应等3个方面,建立描述驾驶员在基本路段上行驶的元胞模型(CAUB),并以此为基础对行程时间特性进行分析.

收稿日期: 2009-11-02.

基金项目: 国家“九七三”计划资助项目(2006CB705505); 高等学校博士学科点专项科研基金资助(20060183065).

作者简介: 祁宏生(1983—),男,江苏阜宁人,博士研究生.

1.1 基本 CA 模型

元胞自动机是时间离散、空间离散、状态离散的模型。Nagel 和 Schreckenberg^[9] 首先提出了著名的 NaSch 模型,该模型包括 4 个基本步骤,用来确定车辆最终的运行状态。随后,一些学者对元胞模型中的运行环境(例如混合交通^[10]等)或者驾驶员行为^[11]进行了修正,以使模拟结果符合实际或者能产生相应的交通现象^[12],这些修正的模型基本遵循 NaSch 模型的 4 个步骤。

步骤 1:加速, $v_i(t+1) \leftarrow v_i(t) + 1$, 其中 $v_i(t)$ 为车辆 i 在 t 时刻的速度;

步骤 2:减速, $v_i(t+1) = \min \{v_i(t+1), v_{\max}, d\}$, 其中 $v_{\max}$ 为最大速度, d 为两车(保险杠之间)距离;

步骤 3:随机慢化,以概率 p 实现 $v_i(t+1) \leftarrow v_i(t+1) - 1$;

步骤 4:位置更新, $x_i(t+1) \leftarrow x_i(t) + v_i(t)$, 其中 $x_i(t)$ 为车辆 i 在 t 时刻的距离。

1.2 换道规则

城市道路上的换道模型不同于一般高速公路上的换道模型,后者以效率为主,其换道行为的描述如图 1 所示,换道激励表达式为 $v_{1,n} > d_1$ 和 $d_3 > d_1$, 其中 $v_{1,n}$ 为本车的速度; d_1 为本车与本车道前车的距离; d_3 为本车与相邻车道前车的距离。

换道安全条件表达式为 $v_{1,n} < d_3$ 和 $v_{2,n} < d_2$, 其中 d_2 为本车与相邻车道后车距离; $v_{2,n}$ 为相邻车道后车的速度,满足以上条件即执行换道,由于元胞自动机模型按照一定的时间步长更新系统的状态,因此,上述条件中速度应乘以时间步长,但由于时间步长一般为 1 s,因此省略该时间步长,直接将速度和距离作比较。

对于城市道路来说,车辆从上游路段驶进本路段时,由于对该路段的情形不熟悉,因而开始时一般不会发生换道行为^[13],该阶段称之为“适应阶段”。过了适应阶段以后,车辆就开始评估周围的交通流环境,根据自己的目标进行换道决策。在该阶段中,车辆既会具有一般高速路上的换道行为,同时也会考虑到自身的转向(左转、直行或者右转),作者将这一阶段称为“自由换道阶段”。当车辆在第 2 阶段中没有可供换道的间隙即没有完成换道的任务而车辆就要到达渠划区进入排队等待且本身又不在目标车道上时,则车辆会渐渐减速,如有合适的间隙则车辆会立即利用该插车间隙完成换道,如果没有合适的插车间隙车辆就会和目标车道的后车合作完成换道,本阶段称为“合作换道阶段”。在实际中,这几个阶段在路段上的分布会随着交通流状态的变化而变化。图 2 所示车辆换道的 3 个阶段用 l_1 、 l_2 、 l_3 来表达, $[0, l_1]$ 为第 1 阶段, $[l_1, l_2]$ 为第 2 阶段, $[l_2, l_3]$ 为第 3 阶段。

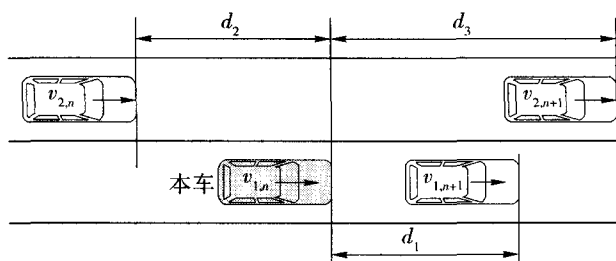


图 1 基本换道条件

Fig. 1 Basic conditions for lane changing

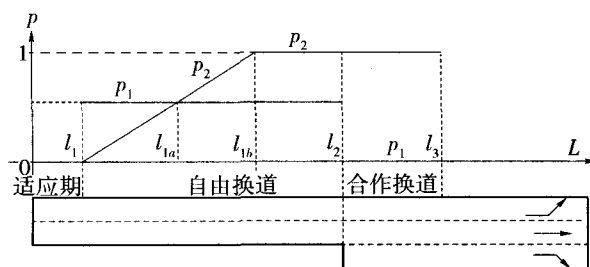


图 2 车辆换道 3 个阶段

Fig. 2 Three stages of lane changing behavior

一般而言,驾驶员换道的目的有 2 种:一是为了获得更快的速度;另一个是为了进入渠划区的转向车道。但是在城市路网中,两者的区分并不明显,因此基于驾驶员驾驶目标将换道分为“目标型换道”和“效率型换道”,目标型换道指为了进入转向车道,效率型换道指为了获得更大的速度。随着驾驶员向行驶,如果驾驶员不在排队车道上,则执行目标型换道对于驾驶员会越来越迫切。用参数 p_1 和 p_2 来反映这两种换道动机。参数 p_1 描述的是效率型换道的概率。这种换道概率在第 2 阶段是不变的。参数 p_2 描述的是目标型换道的概率, p_2 会越来越大,一直到 1,如果驾驶员不在目标车道上,若存在换道机会驾驶员会立即换

道. 车辆在基本路段上的换道逻辑见图 3, 其中 $A \neq B$ 表示车辆所处车道不是最终的转向车道.

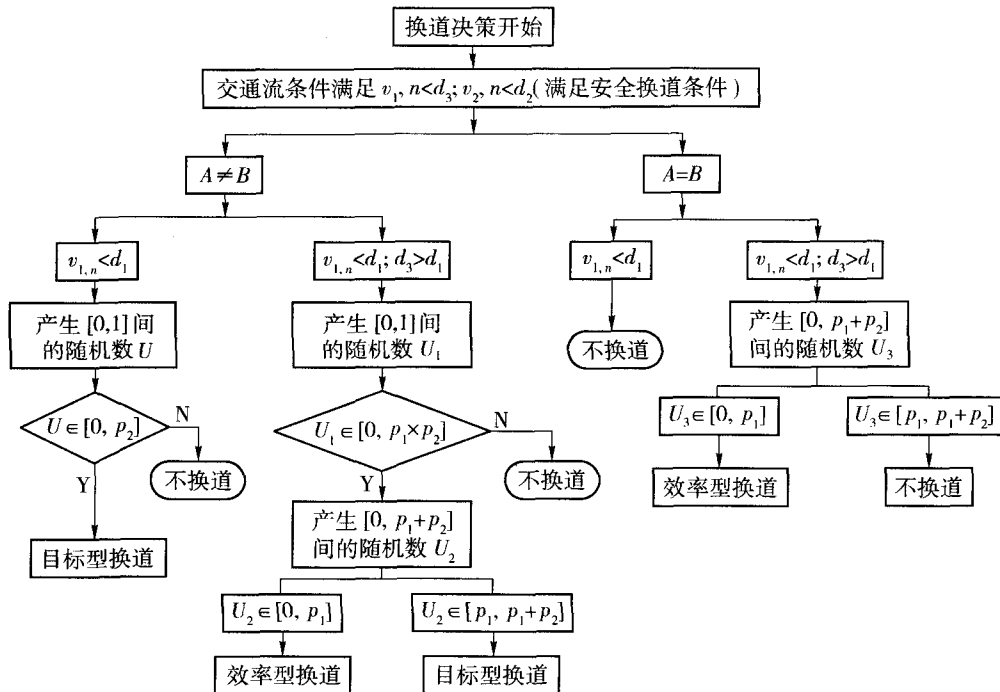


图 3 换道逻辑

Fig. 3 Lane changing logic

如果车辆在第 2 阶段结束时, 其所在车道不是其目标车道, 而此时车辆又很接近于渠化区, 即车辆即将加入前方排队队尾, 因而换道任务对于驾驶员来说比较迫切. 在此阶段, 车辆会慢慢减速, 直至位置 l_3 , 为使问题简化, 认为车辆为线性减速, 即车辆的速度为

$$v_x = v_0(l_3 - x)/(l_3 - l_2) \quad (1)$$

式中 v_0 为车辆到达第 3 换道阶段时 (即处于 l_2 位置时) 的速度. 如果此时目标车道有合适的可插车间隙, 驾驶员会利用该间隙完成换道, 如果目标车道没有合适的可插车间隙, 则驾驶员会通过本车的一些行为 (如打转向灯、开转向灯等) 向目标车道后车发出请求换道信号, 此时, 目标车道的后车会根据自身的情形, 选择合作或者不合作. 如果车辆以均匀减速度至需要换道车辆后方停车, 如果减速度大于最大减速度 $a_{\max}$, 则车辆不会选择合作, 反之, 车辆进行减速为换道车辆提供换道机会, 见图 4 所示. 侧向车道后车的换道合作条件为 $\Delta x > v_2/a_{\max}$.

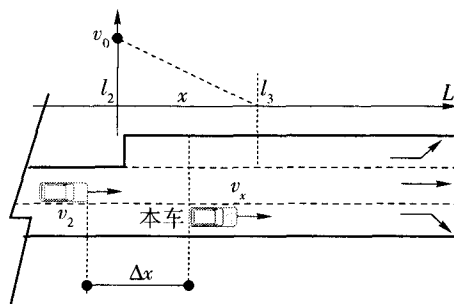


图 4 合作换道示意图

Fig. 4 Sketch map of cooperative lane changing

1.3 车辆对信号控制的反应

基本 NaSch 模型中没有考虑车辆对信号等如何反应. 对于这个问题, 有 2 种处理方式: 1) 当信号灯为红灯时在停车线引入一个虚拟的静止的车辆, 然后即将到达停车线的车根据 NaSch 模型运行^[14]; 2) 另外建立一个规则, 驾驶员不仅考虑其与前车的距离, 还考虑与信号灯之间的距离, 然后根据本车速度、与前车的距离、与信号灯的距离做出决策^[15]. 很显然, 后者更能代表现实状况. 该规则和 NaSch 规则的不同之处在于减速步骤考虑了与信号灯之间的距离; 如果信号灯为红灯, $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n - 1, s_n - 1)$; 如果信号灯为绿灯: 1) 如果下一步长信号灯变红, 则 $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n - 1, s_n - 1)$; 2) 否则 $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n - 1)$.

1.4 城市基本路段 CA 模型 CAUB

综合上述,城市基本路段元胞模型 CAUB 为:1)换道决策 根据 1.2 小节提出的换道规则进行换道决策;2)换道执行 根据换道决策的结果执行换道;3)速度更新 每辆车依照本车加速度进行速度更新,采用并行更新规则;4)位置更新 每辆车依照本车速度进行位置更新,采用并行更新规则。

2 数值模拟

2.1 模拟参数设置

令单个元胞长 $\Delta = 7.5 \text{ m}$. 建立如图 5 中的路段(由于对称性,只建立单向部分),其中 s_1 部分为 70 个元胞长, s_2 部分为 30 个元胞长. 基本元胞模型 NaSch 的 $v_{\max} = 5$ 个元胞/步长,时间步长为 1 s ,慢化概率 $p = 0.5$,换道模型中的 $p_l = 0.5$, $a_{\max} = 4 \text{ m/s}^2$. 通过建立的 CAUB 模型,研究流量因素、信号设置和基本路段行程时间的关系. q_1 为左车道的流入流量, η_{1m} 为 q_1 中左转车辆的比例, η_{1n} 为直行比例, η_{1k} 为右转比例,以此类推, q_{1m} 为从左车道进入路段并左转驶离路段的车流. g_m 为左转绿灯时长, r_m 为左转红灯时长,令 $g_m = r_n$,即左转绿灯时长等于直行红灯时长.

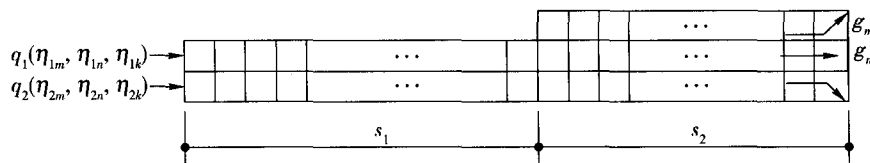


图 5 基本路段元胞划分

Fig. 5 Cell partition

2.2 行程时间特性分析

图 6 是左转绿灯时长 70 s ,直行绿灯时长 50 s ,左车道流量与右车道流量均为 240 辆/h 时分别从左车道和右车道进入路段的直行车辆的行程时间,为了方便显示,在图中对时间轴进行折叠,横轴表示相对周期起始时间进入路段的时刻,“左进直行车辆”表示从车道的车道进入路段的直行车辆. 由图可见,基本路段的行程时间和进入路段车道有关,也和转向、信号设置有关,呈现间断的特性,跳跃的幅度约为对应转向的红灯时长.

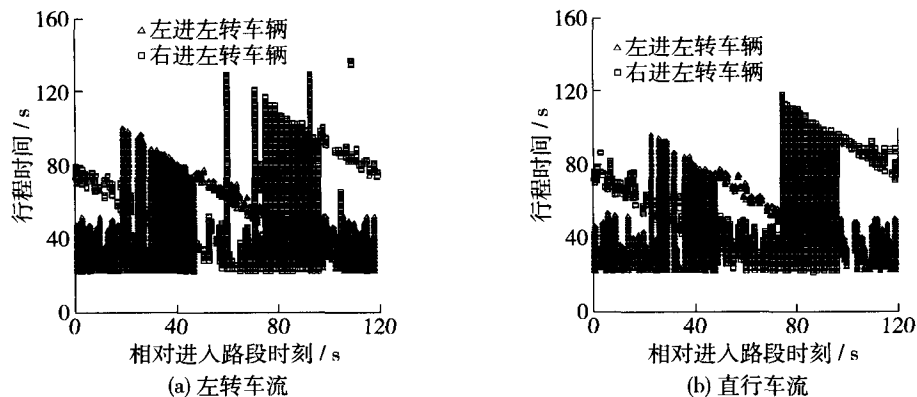


图 6 不同转向流量的行程时间

Fig. 6 Travel time for different turning flow

随着相对进入路段时刻推移,行程时间渐渐变小,降低至最小值并持续一段时间,然后遇到红灯,行程

时间变得很大,然后又逐渐变小. 根据基本的 NaSch 模型,当车间距小于 $v_{\max}$,路段交通流形成稳态之后的两辆车状态如图 7 所示,由于稳态条件下,流量(Q) = 速度(v) $\times$ 密度(k),根据图 7, $k = 1\,000 / (1 + v \times \Delta)$,则 $Q = [1\,000 / (1 + v \times \Delta)] \times (v \times \Delta \times 3.6)$,因此 $v = Q / [\Delta \times (3\,600 - Q)]$. 当车间距大于 $v_{\max}$ 时,车辆无阻滞速度为 $v_{\max}$,则最小行程时间为 $L/v_{\max}$ (即散点图下部分的最小值,由于存在随机慢化的影响,行程时间相应偏大).

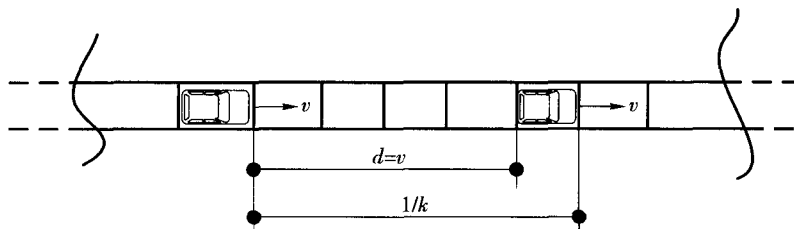


图 7 给定速度下的稳定状态

Fig. 7 Stable condition under given velocity

图 8 显示了其他条件不变、左转和直行比例不同情况下的行程时间,图 8(a)左直比例为 6:4,图 8(b)的左直比例为 4:6. 不同的流量结构不仅会影响到行程时间的突变幅度,还会影响行程时间的突变时刻.

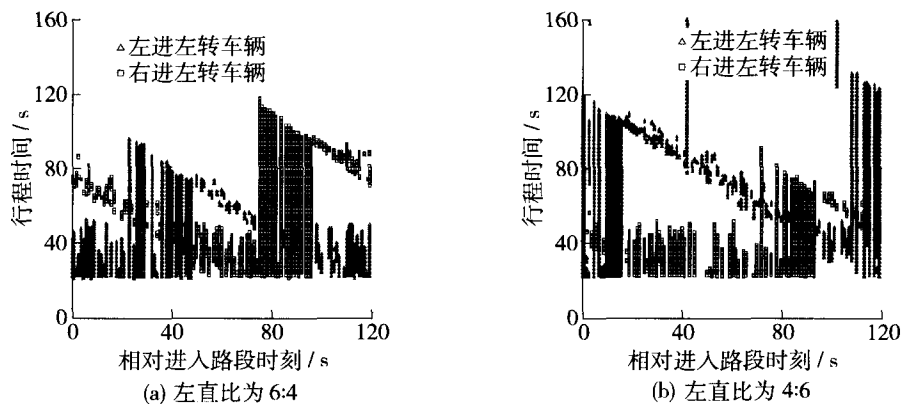


图 8 流量结构不同下的行程时间变化图

Fig. 8 Travel time profile under different flow structure

图 9 是其他条件不变、信号设置不同情况下的行程时间. 图 9(a)的信号设置为 $g_m = 70\text{ s}$, $g_n = 50\text{ s}$,图 9(b)的信号设置为 $g_m = 60\text{ s}$, $g_n = 60\text{ s}$,由图可见,不同的信号设置改变了行程时间突变的时刻.

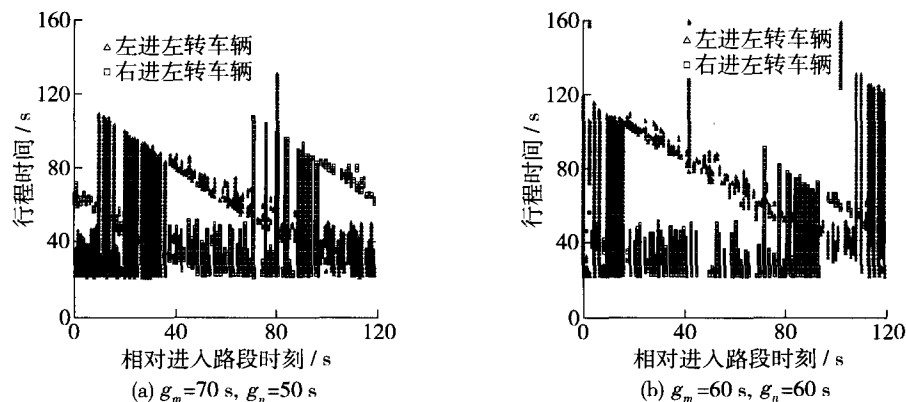


图 9 控制参数不同下的行程时间变化图

Fig. 9 Travel time profile with different signal control

通过上述结果可知,行程时间受信号控制的影响,其变化周期和信号周期保持同步且呈现跳跃的特征;同时,行程时间还受到交通流结构的影响,不同的转向比例的行程时间存在着很大的不同。

3 结束语

城市路网中的交通流运行的环境和高速公路上有很大的区别,不仅和流量本身相关,很大程度上还受其他条件的影响。这种复杂的情况不能简单地用一个函数来表达,基于此,利用基本的 NaSch 模型,考虑驾驶员的换道行为以及对信号设置的反应,建立了城市基本路段的元胞自动机模型 CAUB,并利用 CAUB 对基本路段上的行程时间特性进行了分析。结果表明,行程时间和进入路段的车道、转向、信号设置有关,且呈现间断的特性。行程时间函数是网络交通模型的重要组成部分,其准确性极大地影响着网络交通流模型的性能,而如何在行程时间函数中考虑上述特性是下一步重点研究的内容。

参考文献:

- [1] SI B, ZHONG M, GAO Z Y, Link resistance function of urban mixed traffic network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(1): 68-73.
- [2] FRIESZ L, BERNSTEIN D H, SMITH T E, et al A variational inequality formulation of the dynamic network user equilibrium problem[J]. Operations Research, 1993, 41(1): 179-191.
- [3] RAN B, ROUPHAIL N M, TARKO A, et al. Toward a class of link travel time functions for dynamic assignment models on signalized networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1997, 31(4): 277-290.
- [4] DAGANZO C F. The cell transmission model, part II -network traffic[J]. Transportation Research Part B, 1995, 29B(2): 79-93.
- [5] CAREY M, GE Y E, MCCARTNEY M. A whole-link travel-time model with desirable properties[J]. Transportation Science, 2003, 37(1): 83-96.
- [6] TURNER S M. Advanced techniques for travel time data collection[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996, 1551: 51-58.
- [7] COIFMAN B. Estimating travel times and vehicle trajectories on freeways using dual loop detectors[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2002, 36: 351-364.
- [8] YEON J, ELEFTERIADOU L, LAWPHONGPANICH S. Travel time estimation on a freeway using discrete time markov chains [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(4): 325-338.
- [9] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I France, 1992, 2: 2221.
- [10] MENG Jian-ping, DAI Shi-qiang, DONG Li-yun, et al. Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 380: 470-480.
- [11] JIANG Rui, WU Qing-song. A stopped time dependent randomization cellular automata model for traffic flow controlled by traffic light[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2006, 364: 493-496.
- [12] MILLER A J. Settings for fixed-cycle traffic signals[J]. Operational Research Quarterly, 1963, 14(4): 373-386.
- [13] WEI H, MEYER E, LEE J, et al Characterizing and modeling observed lane-changing behavior: lane-vehicle-based microscopic simulation on urban street network[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1710: 104-113.
- [14] LAW M, CROSTA D. SIGSIM User Guide Part A: SIGSIM Theory[M]. London: Unversity College London, 1999.
- [15] SPYROPOULOU I. Modelling a signal controlled traffic stream using cellular automata[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15(3): 175-190.

Research on Travel Time of Basic Road Based on Cellular Automata

QI Hong-sheng, SONG Xian-min, WANG Dian-hai, GUO Wei-wei

(Transportation College, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The focus of the paper is the research of travel time of urban basic roads with multi-lane and channelized sections as well as traffic signal control. A cellular automata model CAUB is established based on NaSch model through the description of basic move rules, lane changing features, and responses to signals. At last CAUB is used to simulate travel time of basic roads. Results show that the travel time on basic roads displays break nature and is influenced by flow and signal setting, which relates to flow structure.

Key words: traffic engineering; travel time; cellular automata; lane changing behavior

(责任编辑 郑筱梅)

(上接第 1516 页)

Experiment Study on Comprehensive Evaluation Method of Driving Fatigue Based on Physiological Signals

ZHAO Xiao-hua, FANG Rui-xue, RONG Jian, MAO Ke-jun

(Beijing Key Lab of Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A dynamic Driving simulation experiment of thirty subjects is carried out using the virtual driving simulator to analyze the variation of ECG and EEG indicators with driving time, and the experiment validates the effectiveness of the ECG and EEG indicators as the evaluation of driving fatigue. There is a significant correlation between EEG and ECG according to the Pearson Correlation. Finally, the relationship is established between EEG and ECG, and the overall index of driving fatigue is defined by Principal component analysis, which can exclude disturbed factors and lower data volatility, therefore, to improve accuracy of driving fatigue evaluation.

Key words: driving fatigue; driving simulation experiment; electrocardiogram; electroencephalogram

(责任编辑 郑筱梅)