

收费站对高速公路交通流能耗的影响*

Study on the Influence of Tollbooth on Highway Traffic Flow's Energy Loss

韦兰香,梁玉娟**

WEI Lanxiang, LIANG Yujuan

(河池学院物理与机电工程学院, 广西宜州 546300)

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi, 546300, China)

摘要:【目的】为探讨电子收费(ETC)通道设置的必要性,研究高速公路收费站路段的交通流能耗模型。【方法】在元胞自动机 NaSch 交通流模型的基础上,针对单向单车道的收费站路段提出交通流的能耗公式,并数值模拟周期边界条件下车辆在收费站的滞留时间对交通流能耗的影响。【结果】车辆在收费站的滞留时间越长,道路上交通流的能耗值越小,对应的流量和平均速度也越小,交通堵塞现象就越早发生;人工收费站路段的交通流能耗比电子收费站路段的交通流能耗值小。【结论】人工收费站路段比电子收费站路段更容易发生交通堵塞现象。

关键词:交通流 元胞自动机 能耗 收费站

中图分类号:U491.0313 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)01-0092-05

Abstract:【Objective】The energy loss model of highway traffic flow was studied to explore the necessity of electronic toll (ETC) collection channel settings.【Methods】Based on cellular automata NaSch model, the formula of traffic flow's energy loss in the tollbooth of the single lane was put forward. A numerical simulation was conducted under the periodic boundary condition to evaluate the energy loss of traffic flow induced by the residence time of vehicles in the tollbooth.【Results】The longer residence time, the smaller energy loss of road traffic flow, also the smaller traffic flow and average speed are, the sooner traffic jam happens. And the traffic flow's energy loss is smaller in manual toll road than in the electronic toll road.【Conclusion】The traffic jams of the manual toll roads are occur more easily than the electronic toll ones.

Key words: traffic flow, cellular automata, energy loss, tollbooth

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20160315.012

收稿日期:2015-11-28

修回日期:2016-01-10

作者简介:韦兰香(1979—),女,讲师,主要从事交通流理论和大学物理教学理论研究及实验教学。

*河池学院青年科研课题(2013B-N002),广西高校科学技术研究项目(2013ZD059),河池学院重点科研课题(2012YBZ-N006)和广西高校优秀人才资助计划项目(桂教人[2011]40号)资助。

**通讯作者:梁玉娟(1968—),女,教授,主要从事交通流理论和大学物理教学理论研究及实验教学,E-mail:yujuan2267@163.com。

0 引言

【研究意义】随着人们生活水平的提高,私家车越来越多,加之国家节假日高速免费措施的实施,高速公路上的车辆越发密集。车辆在收费站停车交费时,势必会对后车的行驶造成一定程度的阻碍,而随着道路上车辆密度的增大,很容易造成交通拥堵,收费站拥堵已成为道路交通瓶颈之一。而且,在交通拥堵状况下,车辆跟车行驶会频繁的制动、启动、加速、减速等,致使能源消耗增加,尾气排放量增大。为了减少车辆在收费站的滞留时间,提高收费站路段的通行能

力,交通运输部正在分期分批有步骤地推进全国电子收费系统(ETC)联网工程,计划在2015年年底基本实现全国ETC联网,建立全国ETC联网运营管理机制。截止2015年9月广西已有126个收费站,254条ETC车道(占全区收费站的60%左右)实现ETC全国联网^[1]。但是,已设置ETC通道的道路比例仍然有限,而且已办理ETC卡的车辆并不多,加之ETC通道的收费系统时常出现不能识卡现象,使得人工收费通道仍有必要。因此,研究如何提高高速公路收费站路段的通行能力,尽量避免交通拥堵、减少汽车能源消耗有一定意义。【前人研究进展】元胞自动机交通流模型是定义在离散、有限状态的元胞空间,按照一定的局部规则,在离散的时间维度上演化的动力学系统^[2]。该模型具有复杂计算功能、固有的并行计算能力、高度动态、高度灵活性等特征,在模拟复杂的交通运输系统的时空动态演变方面具有强大的功能^[3]。朱留华等^[4]基于NaSch交通流模型,建立关于单车道电子收费和人工收费系统的元胞自动机交通流模型并进行数值模拟;田欢欢等^[5]基于元胞自动机交通流模型,提出元胞自动机混合交通流能耗公式;梁玉娟等^[6-7]在元胞自动机NaSch交通流模型的基础上,提出交通流能耗的公式,研究弯道和坡道路段的交通流能耗特性。【本研究切入点】高速公路收费站对交通流能耗影响理论研究较少。本文针对收费站路段的特征,从能耗角度来研究其交通特性,即以元胞自动机NaSch模型为基础,建立收费站路段的交通流能耗模型,研究车辆在收费站的滞留时间对交通流能耗的影响。【拟解决的关键问题】根据实际的交通状况,取定车辆在收费站前减速路段和其他路段的最大速度,车辆的随机延迟概率,并对车辆在收费站的滞留时间进行数值模拟,发现滞留时间越长,交通流能耗值越小,道路越早出现堵塞相。

1 模型的建立

路段模型示意图如图1所示。用1维点阵代表一条单车道,即行车道由1000个元胞构成,每个元胞对应的实际道路长度为7.5m,道路总长度 $L = 7.5 \text{ km}$ 。行车道上的车辆自左向右行驶,每个元胞在每一时刻处于空闲或容纳一辆车的状态,黑色的元胞为有车状态,空白元胞为无车状态。第480个元胞为收费站前减速路段的起始位置 L_b (左边灰色元胞),第500个元胞为收费站的位置 L_s (右边灰色元胞), L_a 为收费站前减速路段的长度(占20个元胞,即150m)。系统采用周期性边界条件,车辆从左向右行驶,当驶出右边界后,从左边界重新进行^[8]。

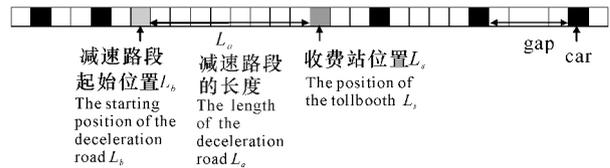


图1 有收费站的高速公路路段模型示意图

Fig.1 Schematic model of the highway with tollbooth

1.1 车辆最大速度和延迟概率的确定

用 P 表示车辆的随机延迟概率, v_{\max} 表示车辆的最大速度。假设行车道上每辆车均占一个元胞,每辆车的状态由该车的速度 v 来表示, $v \in [0, v_{\max}]$ 。当车辆行驶在减速路段上时,用 $v_{\max 1}$ 表示其最大速度,令 $v_{\max 1} = 1 \text{ cell/s}$ (即27 km/h),车辆在其他区域上行驶时,用 $v_{\max 2}$ 表示其最大速度,令 $v_{\max 2} = 5 \text{ cell/s}$ (即135 km/h)。假设车辆在所有区域的随机延迟概率都相同,令 $P = 0.25$ 。

1.2 NaSch模型的演化规则

- (1) 确定性加速过程: $v_n(t) \rightarrow \min(v_n(t) + 1, v_{\max})$;
- (2) 确定性减速过程: $v_n(t) \rightarrow \min(v_n(t), gap_n(t))$;
- (3) 以概率 P 随机减速过程: $v_n(t) \rightarrow \max(v_n(t) - 1, 0)$;
- (4) 位置更新过程: $x_n(t) \rightarrow x_n(t) + v_n(t)$ 。

其中, $v_n(t)$ 和 $x_n(t)$ 分别为车道上第 n 辆车在 t 时刻的速度和位置, $x_{n+1}(t)$ 则是车道上第 $n+1$ 辆车在 t 时刻的位置, $gap_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - 1$ 是 t 时刻第 n 辆车与前方紧邻车辆之间的元胞数。

1.3 能耗的定义

车辆由于运动而具有的能量称为动能。若车辆的质量为 m ,速度为 v ,则其动能为 $mv^2/2$ 。当车辆作减速运动时,其动能减少,即能量消耗,简称能耗。在文中,第 n 辆车从 $t-1$ 到 t 时间内的能耗^[5]为

$$e(n, t) = \begin{cases} \frac{m}{2}[v^2(n, t-1) - v^2(n, t)], & v(n, t) < v(n, t-1), \\ 0, & v(n, t) \geq v(n, t-1), \end{cases}$$

则每辆车在单位时间内的平均总能耗为

$$E = \frac{1}{T} \frac{1}{N} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} \sum_{n=1}^N e(n, t),$$

其中 N 是车道上的总车辆数, T 是统计时间, t_0 是弛豫时间。

根据NaSch模型的演化规则,车辆进行减速缘于两个方面的原因:确定性减速和随机减速。我们用 E_i 表示确定性减速产生的车辆能耗,用 E_r 表示随机减速产生的车辆能耗,则车辆总能耗 $E = E_i + E_r$ 。

2 数值模拟

用 C 语言编写程序,以实现计算机数值模拟。在模拟中,假设长为 L 的行车道上共有 N 辆车,车辆密度 $\rho = N/L$,平均车流量 $J = \rho V$,而车辆的平均速度为

$$V = \frac{1}{T} \frac{1}{N} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} \sum_{n=1}^N v_n(t)。$$

在数值模拟计时开始时,让车辆以一定的比例和车辆密度 ρ 随机分布在一维 1 000 个元胞链 L 上。每次运行取 40 000 时间步进行数值模拟,为消除暂态的影响,前 20 000 时间步不进行统计,之后的 20 000 时间步每个时间步对速度 $v_n(t)$ 和能耗 $e(n,t)$ 进行统计,每次运行的平均速度和平均能耗即 20 000 时间步的速度和能耗对时间求平均。考虑到随机问题,为减小随机误差,对 20 次运行取平均值。

对人工收费高速公路,领卡耗时较短,对道路交通的影响较小,而交卡、交费耗时较长,对道路交通的影响较大。故进行数值模拟时,以交卡、交费耗时作为人工收费车辆在收费站的滞留时间 T 。而经实际测量发现,车辆在收费站滞留的时间范围为 10.02 ~ 24.83 s,滞留时间的平均值为 16.48 s。而在正常交通情况下,ETC 车道是禁止停车的。因此,在进行数值模拟时,人工收费车辆的滞留时间 T 在 10 s 到 25 s 取值,滞留时间的平均值为 17 s,电子收费车辆的滞留时间为 $T=0$ s。为了方便,车辆的质量 m 取 1。

3 人工收费车辆滞留时间对交通流能耗的影响

数值模拟得到的结果如图 2~6 所示。图 2a 结果显示,在车辆密度较小的时候,能耗 E_i 较大;当车辆密度增大时,能耗 E_i 随着密度的增加逐渐减小到零。在同一密度下,滞留时间 T 越大,能耗 E_i 越小。图 2b 结果显示,在车辆密度较小的时候,能耗 E_r 较大;当车辆密度增大时,能耗 E_r 随着密度的增加逐渐减小到零。在同一密度下,滞留时间 T 越大,能耗 E_r 越小。从图 3 可以看出,车辆在收费站的滞留时间不同,动能损耗也不同。在车辆密度较小时,能耗 E 较大;当车辆密度增大时,能耗 E 随密度的增加逐渐减小到零。在密度小于 0.03 时,滞留时间 T 对总能耗 E 的影响较小;在密度为 0.03~0.5 时,滞留时间 T 对总能耗 E 的影响较大;在密度大于 0.5 时,滞留时间 T 对总能耗 E 的影响也较小。从图 3 还可以看出,在同一密度下, T 越大, E 越小。当取定密度为 $\rho=0.09$,滞留时间 T 分别为 10 s、15 s、20 s、25 s

时,对应的能耗 E 分别为 0.150,0.104,0.078,0.065。此时对应的流量和平均速度也越小(图 5),道路越早进入堵塞相。而在同一滞留时间 T 下,道路车辆密度越大,能耗值越小。当取定滞留时间 $T=10$ s,密度 ρ 分别为 0.03,0.06,0.09,0.12 时,对应的 E 分别为 0.409,0.257,0.150,0.103。此时对应的时空演化斑图显示,道路的堵塞现象越来越严重(图 6,纵轴为时间,横轴为位置,黑点表示有车,白点表示无车,收费站位于第 500 个元胞)。

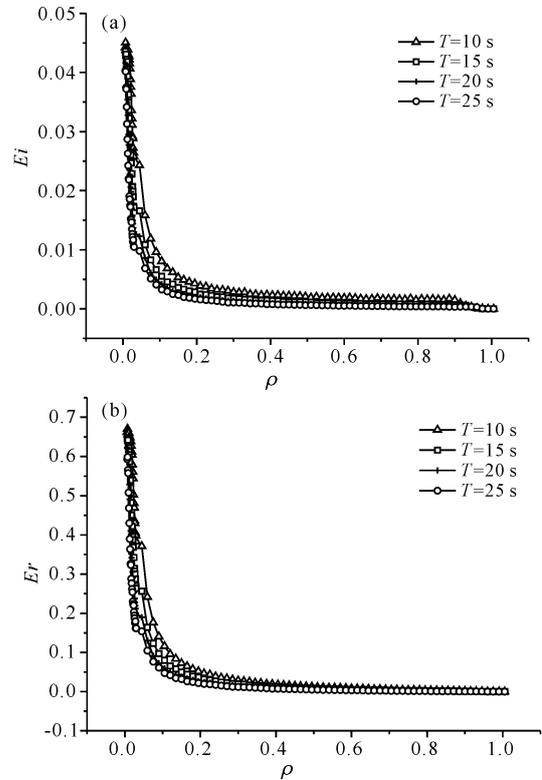


图 2 不同滞留时间 T 下的能耗-密度图

Fig. 2 Energy loss-density plot under different residence time T

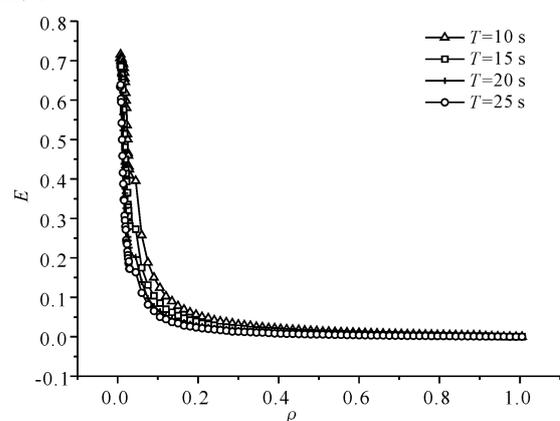


图 3 不同滞留时间 T 下的总能耗-密度图

Fig. 3 The total energy loss-density plot under different residence time T

从图 4 可看出, E_i 、 E_r 、 E 随密度的变化关系相似,均随着密度的增大从初值逐渐减小到零。而 E_r 、

E 随密度的变化曲线几乎重合,说明总能耗 E 主要是由随机减速能耗 E_r 引起。结合图 5 可知,当 $T = 10$ s,车辆密度大于 0.05 时流量开始下降,平均速度也在减小,说明车辆在密度较小时就进入时停时走的跟车行驶状态。因此,在行驶过程中,车辆由于车间距过小而进行确定性减速所引起的能耗 E_i 较小,因为车辆在前后时刻的速度差值很小;而车辆由于路况、环境、气候、驾驶员习惯等随机减速引起的能耗 E_r 较大。

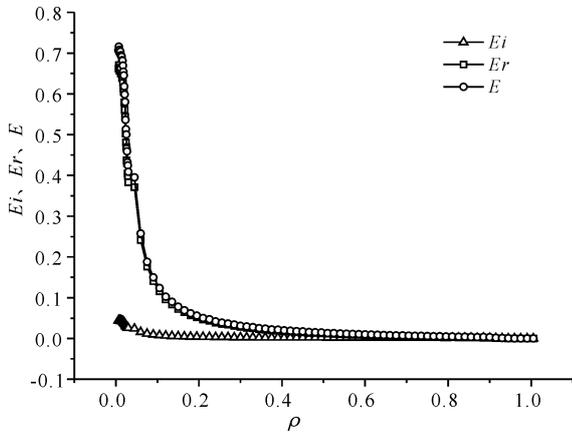


图 4 同一滞留时间 T 下的能耗-密度图 ($T = 10$ s)

Fig. 4 Energy loss-density plot under the same residence time $T(T = 10$ s)

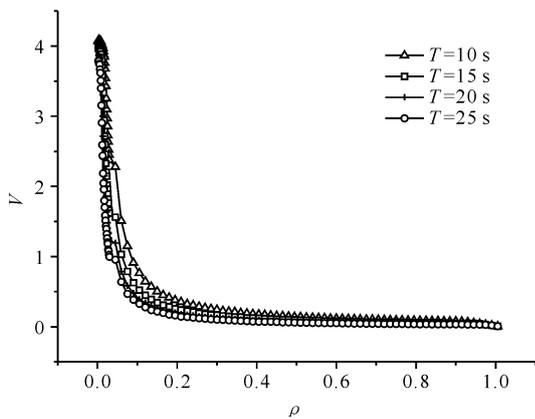
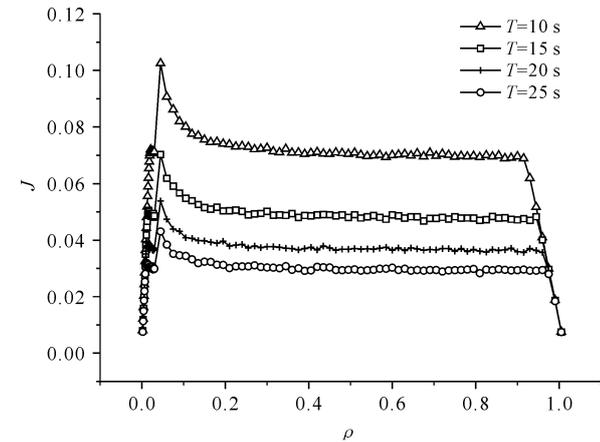


图 5 不同滞留时间 T 下的基本图

Fig. 5 The basic figure under different residence time T

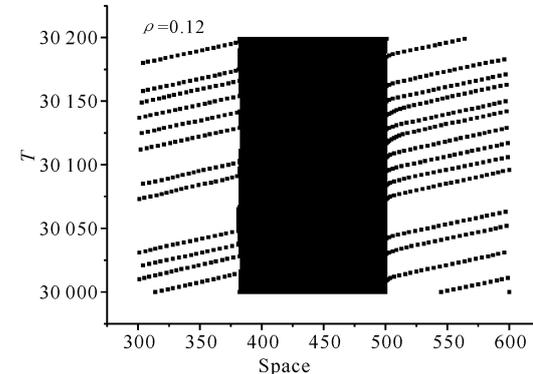
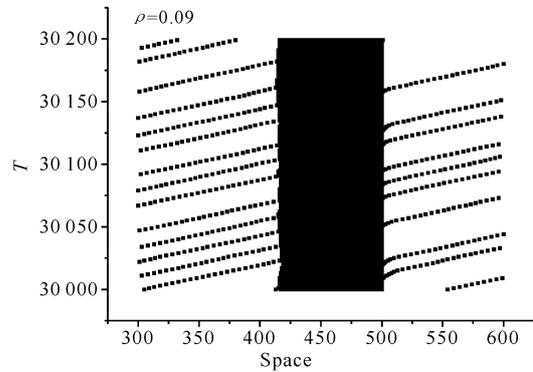
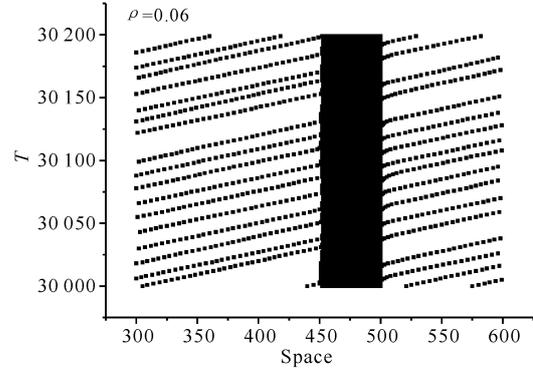
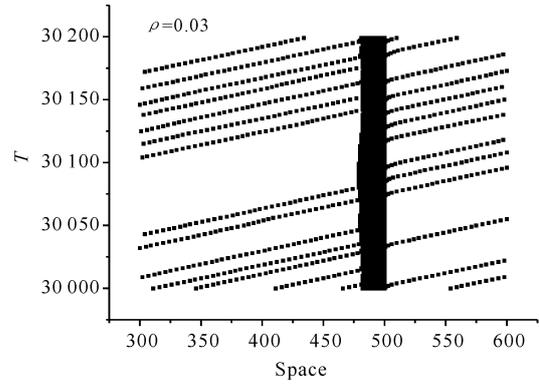


图 6 不同密度下的时空演化斑图 ($T = 10$ s)

Fig. 6 The space-time evolution patterns under different density ($T = 10$ s)

而将人工收费车辆滞留时间和电子收费车辆滞留时间对交通流能耗的影响进行比较,发现人工收费情况下道路交通流能耗值较小,道路更容易进入交通堵塞状态(图 7)。

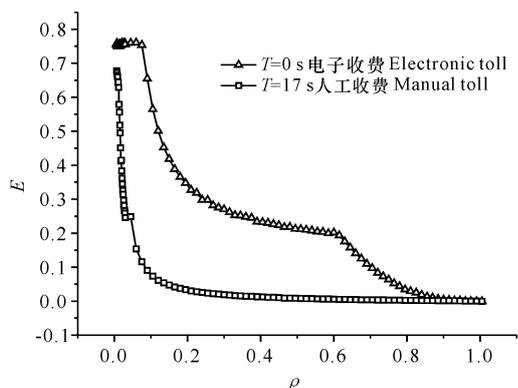


图7 电子收费与人工收费情况下的总能耗-密度图

Fig. 7 The total energy loss-density plot of electronic toll and manual toll

4 结论

本文针对单向单车道的高速公路收费站路段上车辆的行为过程建立车辆元胞自动机行为规则,并数值模拟周期边界条件下人工收费车辆在收费站滞留的时间 T 对道路交通流能耗的影响,得到以下结论:

(1)低密度和高密度时, T 对交通流能耗的影响较小,在中密度时, T 对交通流能耗的影响较大;

(2)在同一密度下,车辆滞留时间越长,能耗值越小,对应的流量和密度越小,道路越早进入堵塞状态;

(3)在同一滞留时间下,车辆密度越大,能耗值越小,道路的堵塞现象越明显。

(4)人工收费情况下道路交通流能耗值较小,比电子收费道路更容易进入交通堵塞状态。

参考文献:

[1] 广西日报社. 广西高速公路 ETC 实现全国联网. [EB/OL]. [2015-03-12]. http://www.gxzf.gov.cn/zjgx/jrgx/201509/t20150929_478504.htm.
Guangxi Daily. Guangxi highway ETC has connected to the Internet [EB/OL]. [2015-09-29]. http://www.gxzf.gov.cn/zjgx/jrgx/201509/t20150929_478504.htm.
[2] 郭四玲. 元胞自动机交通流模型的相变特性研究和交通实测分析[D]. 南宁:广西大学,2006.
GUO S L. Study on the Characteristics of Phase Transi-

tion in Cellular Automaton Models for Traffic Flow and Analysis of Traffic Empirical Data[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.

[3] 薛郁,董力耘,戴世强. 一种改进的一维元胞自动机交通流模型及减速概率的影响[J]. 物理学报, 2001, 50(3): 445-449.
XUE Y, DONG L Y, DAI S Q. An improved one-dimensional cellular automaton model of traffic flow and the effect of deceleration probability[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(3): 445-449.
[4] 朱留华,陈时东,孔令江,等. 过路收费站对高速公路交通的影响[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5674-5678.
ZHU L H, CHEN S D, KONG L J, et al. The influence of tollbooths on highway traffic[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5674-5678.
[5] 田欢欢,薛郁,康三军,等. 元胞自动机混合交通流模型的能耗研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4506-4513.
TIAN H H, XUE Y, KANG S J, et al. Study on the energy consumption using the cellular mixed traffic model [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4506-4513.
[6] 梁玉娟. 从动能损失看弯道路段的通行能力[J]. 四川师范大学学报:自然科学版, 2011, 34(3): 355-359.
LIANG Y J. Investigation of the traffic capacity in the bend by the loss of kinetic energy[J]. Journal of Sichuan Normal University: Natural Science, 2011, 34(3): 355-359.
[7] 梁玉娟. 基于坡道元胞自动机模型的能耗研究[J]. 广西科学, 2011, 18(1): 44-47.
LIANG Y J. Investigation of the energy dissipation based on cellular automatic model of slope [J]. Guangxi Sciences, 2011, 18(1): 44-47.
[8] 刘小明,王力. 考虑路内停车的元胞自动机交通流模型[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(2): 327-333.
LIU X M, WANG L. Cellular automaton traffic flow model considering on-street parking[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(2): 327-333.

(责任编辑:尹 闯)