

高速公路坡道对交通流的影响*

The Effect of Uphill Gradient Bottleneck on Freeway Traffic

李盛春, 孔令江, 刘慕仁**

LI Sheng-chun, KONG Ling-jiang, LIU Mu-ren

(广西师范大学物理与电子工程学院, 广西桂林 541004)

(College of Physics and Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要: 采用周期边界条件, 建立单车道不同路段最大速度不同的元胞自动机交通流模型, 模拟研究坡道长度、坡道倾度、较慢车混合比例和增设爬坡道对高速公路交通流的影响。结果表明, 坡道长度不同时, 车辆的临界密度相同, 车辆达到临界密度之前的平均速度随坡道长度的增加而减小, 在中等密度区域对应的交通流量随坡道长度的增大而减小; 坡道倾度增大时, 车辆平均速度明显减小, 相应的车辆临界密度也减小, 在中等密度区域内的最大流量随着坡道倾度增大而迅速减小; 只要有较慢车存在, 不同较慢车的混合比例对交通流的影响基本相同; 增设爬坡道前后车辆的临界密度相同, 增设爬坡道后的车辆平均速度比没有爬坡道时大, 密度不是特别大时, 增设爬坡道可以大大提高高速公路的通行能力。

关键词: 交通流 坡道 瓶颈效应 元胞自动机 NaSch 模型

中图分类号: O 550 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2008)01-0047-05

Abstract Considering the different maximum speed of vehicles run on different road sections, we present a Cellular Automaton model for single-lane vehicle traffic flow under the periodical boundary condition. We study the effects of uphill gradient and after setting up the uphill-climbed gradient lane on freeway traffic. The results indicate that the critical density of traffic flow is the same with different slope length. Before the critical density, the average speed decreases with the increasing of the slope length. In the moderate density region, the traffic flow decreases a little with the increasing of the slope length; When the dumping of slope increase, the average speed decreases greatly even in free flow, the corresponding critical density decreases too. After the critical point, the speed decreases greatly with the increasing of the slope dumping. All the speeds are not the same until the density is large enough. In the moderate density region, the max traffic flow decreases soon with the increasing of the slope dumping, and the proportion of slower vehicles have no strong influence on the traffic flow; the critical density of traffic flow is not changed after setting up another uphill gradient. Before the critical point, when set up the uphill-climbed gradient, the speed decreases soon with the increasing of the density, but it is bigger. After the critical point, when the density is not large enough, the speed is still bigger. The speed in the two conditions are not the same until the density large enough.

Key words vehicle traffic flow, uphill gradient, bottleneck effects, cellular automaton, NaSch model

收稿日期: 2007-07-18

作者简介: 李盛春(1980-),男,硕士研究生,主要从事交通流研究。

* 国家自然科学基金项目(10362001, 10562001),广西自然科学基金

项目(0007017),广西研究生教育创新计划项目(0711M68)资助。

** 通讯作者。

随着日益增长的交通建设和管理的需要,道路交通问题成为近年来研究的热点课题^[1~10]。人们提出了各种各样的模型来描述交通流的特性,而元胞自动机模型(简称CA)由于其自身的优越性,如算法简单、灵活可调,可以有效地在计算机上进行模拟等,被

广泛地应用于交通流的研究 最简单的 CA模型是 Wolfram所命名的描述单车道交通流的 184号规则模型,在此基础上 Nasch和 Schrechenber提出考虑车辆随机加减速的 CA模型(简称 NaSch模型)^[1], Fukui和 Ishibashi提出了含高速车并可以随机减速的 CA模型(简称 FI模型)^[2]。这些模型的提出,使我们对于道路交通问题的认识更加深刻。

瓶颈效应问题对交通流的影响引起了人们的广泛注意。瓶颈问题包括进出口匝道、交叉路口、收费站路口、狭窄路段、坡道等^[3],对于瓶颈问题的解决,有利于提高道路交通速度和流量 我国幅员辽阔,山区众多,道路存在很多坡道,因此,研究坡道对交通流的影响就有着特别重要的意义 本文采用周期边界条件,以 NaSch模型为基础,建立单车道不同路段最大速度不同的元胞自动机交通流模型,研究高速公路存在坡道对单车道交通流的影响,并和增设爬坡道后的交通流进行比较,以求得出一些符合解决山区实际交通问题的有意义的结论。

1 模型与计算机模拟

1.1 模型

含有爬坡道的高速公路模型如图 1所示,道路交通系统是由长度为 $L = 1000_{\text{cell}}$ 的一条格点链构成。假设坡道在道路的中间,即 500_{cell} 处,有两种爬坡道方案(A)和(B),增设爬坡道后,速度较慢的车转到爬坡道上行驶

图 1中车道上每一格点在某时刻或为空或被一辆车占据。初始时刻最大速度 $V_{\text{Max1}} = 5_{\text{cell/s}}$ 的快车(如小汽车)和 $V_{\text{Max2}} = 4_{\text{cell/s}}$ 的较慢车辆(如货车)按比例随机分布在车道上。没有爬坡道时,在坡道上 $V_{\text{Max1}} = 5_{\text{cell/s}}$ 的车辆最大速度保持不变, $V_{\text{Max2}} = 4_{\text{cell/s}}$ 的车辆最大速度减小。增设爬坡道后,方案(A)的坡道上没有隔离带, $V_{\text{Max2}} = 4_{\text{cell/s}}$ 的车辆在坡道上条件允许则转到爬坡道上,最大速度减小,在坡道顶端上条件允许则又转回主车道,最大速度变回 $V_{\text{Max2}} = 4_{\text{cell/s}}$ 。 $V_{\text{Max1}} = 5_{\text{cell/s}}$ 的快车不转道,且最大速度保持不变。方案(B)的坡道上有隔离带, $V_{\text{Max2}} = 4_{\text{cell/s}}$ 的车辆在坡道底端条件允许则必须转到爬坡道上,否则在交叉路口处等候,在坡道中间不能转道,转道后最大速度减小,到达坡道顶端后转回主车道; $V_{\text{Max1}} = 5_{\text{cell/s}}$ 的快车不转道,且最大速度保持不变。

车辆在周期边界条件下自左往右运动,没有爬坡道时在车道上按 NaSch 规则进行演化。增设爬坡道后,由 NaSch 演化和转道演化两个步骤完成。

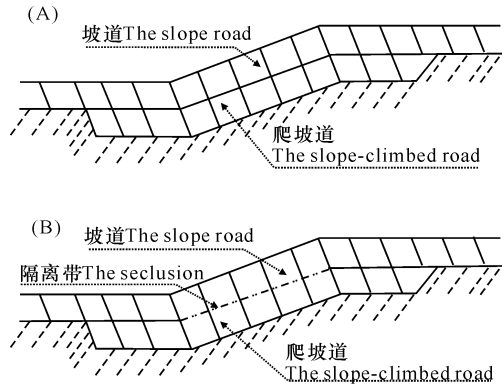


图 1 两种爬坡方式

Fig. 1 Two ways of climbing

(A)没有隔离带;(B)有隔离带。

(A) No seclusion; (B) Have seclusion.

(1) NaSch模型演化规则

1)加速: $V_i^j(t + \frac{1}{3}) \rightarrow \min(V_{\text{max}}^j, V_i^j(t) + 1)$;

2)确定性减速: $V_i^j(t + \frac{2}{3}) \rightarrow \min(V_{\text{max}}^j, (t + \frac{1}{3}), gap_i^j(t))$;

3)以概率 P_d 随机慢化: $V_i^j(t + 1) \rightarrow \max(V_i^j(t + \frac{2}{3}) - 1, 0)$;

4)位置更新: $X_i(t + 1) \rightarrow X_i(t) + V_i^j(t + 1)$

(2)转道规则

1)超车规则:在特定区域上条件允许则百分之百超车;

2)安全性原则: $gap_i^{\text{back}} > gap_{\text{safety}}$

其中 $x_i(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻在某车道上的位置, V_i^j 表示车道第 i 辆车的速度, V_{max}^j 对应车辆的最大速度, P_d 为随机减速概率, gap_i^{back} 为第 i 车辆与邻道后方紧邻车辆间距 安全距离 $gap_{\text{safety}} = \max(V_i^j(t) + 1, V_{i+1}^j)$

1.2 计算机模拟

没有爬坡道时,系统由一条 L 个离散格点的车道组成,某时步 t 车道上总车辆数为 N_t 。则此时步车道平均密度为 $d = \frac{N_t}{L}$,平均速度为 $v_t = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} V_i(t)$,初始时刻,车辆按比例随机分布在车道上。取车道长为 $L = 1000_{\text{cell}}$,每个格点对应的实际道路长为 7.5m ,整个格点链对应的道路实际长度 7.5km ,演化时步为 20000 ,取后 2000 时步作时间平均,则平均速度为 $V = \sum V_t / t$,平均流量 $J = d \cdot V$ 。 K 表示较慢车混和比例系数, L_p 表示坡道长度。为消除随机性对结果的影响,对 30 个样本作系综平均。

2 结果与分析

2.1 坡道长度对交通流的影响

从图 2 结果可以看出,坡道长度不同的情况下,车辆的临界密度是相同的。车辆达到临界密度之前,平均速度随坡道长度的增加而减小,因为在坡道上,较慢车的最大速度从 $V_{Max2} = 4\text{cell/s}$ 减小到 $V_{Max2} = 2\text{cell/s}$,而坡道越长,处在坡道上的较慢车就越多,导致系统平均速度减小。车辆达到临界密度后,不同坡道长度条件下的车辆平均速度是相同的,因为在堵塞相,车辆运动相互影响,只要有车辆处于低速状态,后面的车辆就会受到限制,平均速度就会下降。在中等密度区域,对应的交通流量也是随坡道长度的增大而减小。

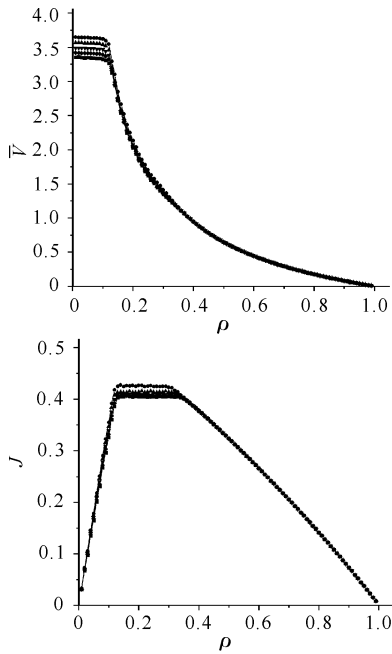


图 2 不同坡道长度下系统交通流平均速度、流量随密度的变化情况 ($P_d = 0.25, K = 0.25, V_{Max2} = 2\text{cell/s}$)

Fig. 2 The dependence of the traffic flow and the average speed on the density of vehicles d for different values L_p ($P_d = 0.25, K = 0.25, V_{Max2} = 2\text{cell/s}$)

—●—: $L_p = 20$; —▲—: $L_p = 40$; —▼—: $L_p = 60$; —◆—: $L_p = 80$; —■—: $L_p = 100$.

2.2 坡道倾度对交通流的影响

假定坡道倾度 S 跟较慢车在坡道上的最大速度成反比,即 $S = k \frac{1}{V_{Max2}}$,其中 k 为比例系数。令 $k = 1$,

则 $S = \frac{1}{V_{Max2}}$ 。 S 取值为 $1/4, 1/3, 1/2, 1$; $S = 1/4$ 为没有坡道的情况, $S = 1$ 为坡道倾度最大值。从图 3 结果可以看出,倾度 $S = 1/3$ 时车辆平均速度稍微比没有坡道时小,当 S 再增大时,在自由运动相时车辆平均速度明显减小,相应的临界密度也减小。超过临界密

度后, S 增大,车辆平均速度也是明显减小,直到密度很大时所有情况的平均速度才相等。在中等密度区域内, S 增大时,车辆最大流量减小很快,如 $S = 1/2$ (对应较慢车最大速度 2cell/s ,即 54km/h) 时流量约 0.42 ,而 S 增大到 1 (对应较慢车最大速度 1cell/s ,即 27km/h) 时,流量迅速减小到 0.2 左右。因此,在修建道路的时候,应尽可能地减小道路坡道倾度,必要的时候可以采用隧道或立交桥的方式。

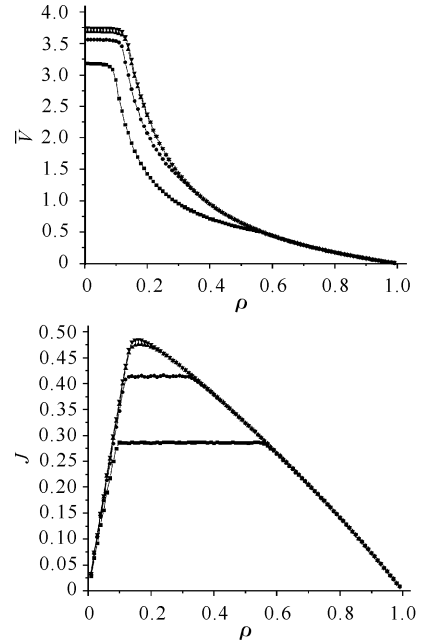


图 3 不同坡道倾度下系统交通流平均速度、流量随密度的变化情况 ($P_d = 0.25, K = 0.25, L_p = 40$)

Fig. 3 The dependence of the traffic flow and the average speed on the density of vehicles d for different values P_d ($P_d = 0.25, K = 0.25, L_p = 40$)

—■—: $S = 1$; —●—: $S = 1/2$; —▲—: $S = 1/3$; —▼—: $S = 1/4$.

2.3 较慢车混合比例对交通流的影响

从图 4 结果可以看出,无论在自由运动相还是在堵塞相,只要有较慢车存在,不管混合比例如何,车辆的平均速度都是相同的。因为在同一条道路上,只要有慢车存在,特别是坡道上较慢车最大车速较小,后面的快车速度就会受到限制,速度会迅速下降,因此系统平均速度由慢车速度决定,只有当 $K = 1$ (即没有慢车的时候,平均速度才会比较大。在自由运动相或堵塞相下,只要有较慢车存在,相应的交通流量大小也基本相同。

2.4 增设爬坡道对交通流的影响

为了便于比较,这里计算速度和流量时不考虑坡道上的车辆。从图 5 结果可以看出,增设爬坡道前后系统的临界密度都是相同的。在临界密度前,增设爬坡道后车辆平均速度会随密度的增大而迅速减小,但都比没有爬坡道时的速度大。超过临界密度后,在密度

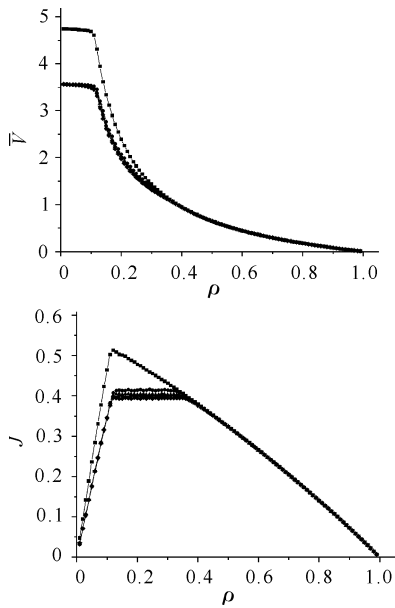


图4 不同较慢车混合比例下系统交通流平均速度、流量随密度的变化情况 ($P_d = 0.25, L_p = 40, V_{Max2} = 2\text{cell/s}$)

Fig. 4 The dependence of the traffic flow and the average speed on the density of vehicles d for different values K ($P_d = 0.25, L_p = 40, V_{Max2} = 2\text{cell/s}$)

—■—: $K = 0$; —●—: $K = 0.25$; —▲—: $K = 0.50$; —▼—: $K = 0.75$; —◆—: $K = 1.00$.

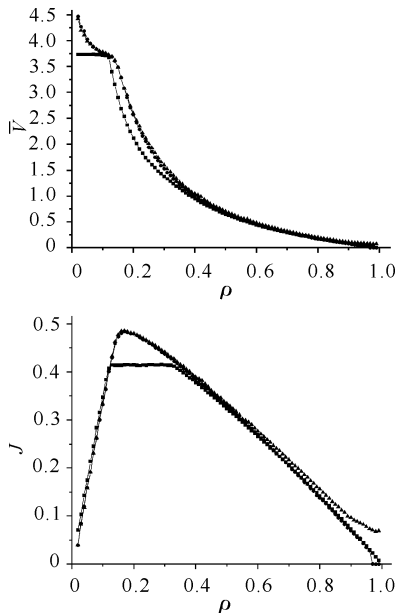


图5 系统交通流平均速度、流量随密度变化情况 ($P_d = 0.25, L_p = 40, K = 0.25, V_{Max2} = 2\text{cell/s}$)

Fig. 5 The dependence of the traffic flow and the average speed on the density of vehicles d ($P_d = 0.25, L_p = 40, K = 0.25, V_{Max2} = 2\text{cell/s}$)

—■—: 没有坡道; —●—: 方案 (A); —▲—: 方案 (B)
—■—: No uphill gradient lane; —●—: Programme (A); —▲—: Programme (B).

还不太大的情况下,速度还是比没有爬坡道时大。直到密度很大时,两种情况的平均速度才会趋于相等。

这是因为密度很大时,不管是方案 (A)还是方案 (B),爬坡道上的较慢车辆没有机会转到主道上来,爬坡道的作用就消失。在密度不是特别大的情况下,两种爬坡道方案的效果都是相同的。但是方案 (A)较慢车可以在坡道中间任何地方转道,而方案 (B)所有较慢车从坡道底端就开始转道,减少了转道的随意性,能够增加车辆行驶的安全性。因此,在车辆密度不是特别大时,增设爬坡道可以大大提高道路交通的通行能力。在修建高速公路时,合理设置爬坡道是一个有效的选择。

增设爬坡道前后由畅通相向阻塞相的演化过程如图6所示,其中空间位置为300~700,时间为19600~20000,黑点表示车辆,白点表示空白区域。从图6可以很明显地看出,在此密度条件下,不设爬坡道的堵塞相当明显,而且堵塞向后传播。而设爬坡道(方案(A))后堵塞区域较小。主要原因就是较慢车转到爬坡道上,而没有滞留在坡道上影响其它车辆的通行,增设爬坡道后可有效地减缓交通堵塞现象。

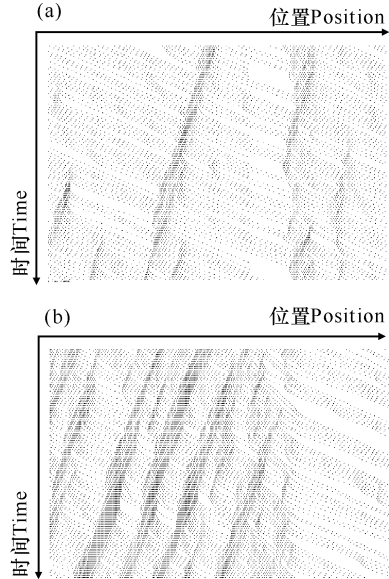


图6 增设爬坡道前后的时空演化 ($d = 1.6, K = 0.25, L_p = 40, S = 1/2$)

Fig. 6 The evolution pattern of space-time before and after setting up another uphill gradient lane ($d = 1.6, K = 0.25, L_p = 40, S = 1/2$)

(a)设爬坡道(方案(A));(b)不设爬坡道

(a) Have uphill gradient lane (Programme(A)); (b) No uphill gradient lane.

3 结束语

本文在 NaSch 模型基础上,采用周期边界条件,模拟存在坡道的高速公路单车道交通流。结果表明,坡道的倾度和长度对交通流有重大影响,增设爬坡道后道路交通的通行能力有很大提高。

当前我国正值高速公路建设高峰,国家对公路投入逐年增大.在进行道路基础设施建设时,考虑影响通行的各种瓶颈效应,可以有效地提高道路利用率,增强道路交通的运行能力.

参考文献:

- [1] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic [J]. *J Phys I France*, 1992, 2: 2221-2229.
- [2] Fukui M, Ishibashi Y. Traffic flow in 1D cellular automation on model including cars moving with high speed [J]. *J Phys Soc(Japan)*, 1993, 65: 1868-1870.
- [3] Feng Li, Zhang Xiuyuan, Gao Ziyu. The effect of restricted velocity in the two-lane on-ramp system [J]. *Physica A*, 2007, 374: 827-834.
- [4] Chow Dhury D, Santen L, Schadschneider A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems [J]. *Phys Rep*, 2000, 329: 199.

- [5] 何云,陈若航,吕晓阳.一维 DCA 交通流模型分析 [J]. *广西师范大学学报:自然科学版*, 1997, 15(1): 49.
- [6] 谭惠丽,刘慕仁,孔令江.单速及多速车道元胞自动机交通流模型的研究 [J]. *广西师范大学学报:自然科学版*, 2001, 19(2): 8-12.
- [7] 吕晓阳,刘慕仁,孔令江.一维元胞自动机交通流模型的理论分析与计算机实验 [J]. *物理学报*, 1998, 47(11): 1761-1768.
- [8] 郑容森,谭惠丽,孔令江,等.开放边界双车道混合车辆交通流的研究 [J]. *广西师范大学学报:自然科学版*, 2005, 23(2): 1-4.
- [9] 刘海英,谭惠丽,孔令江,等.十字交叉路口交通流的控制和管理研究 [J]. *广西科学*, 2006, 13(4): 338-341.
- [10] 李启朗,邝华,谭惠丽,等.驾驶员的驾驶特性对交通流的影响 [J]. *广西科学*, 2006, 13(1): 27-30.

(责任编辑:韦廷宗)

(上接第 46 页 Continue from page 46)

- [4] 涂玉松,李晓,邓敏芝,等.一维 Sznajd 舆论模型相变的研究 [J]. *广西师范大学学报:自然科学版*, 2005, 23(3): 5-8.
- [5] Santo Fortunato. The sznajd consensus model with continuous opinion [J/OL]. [2007-06-25]. http://arxiv.org/ps_cachelcondmat/pdf/0407/0704353v1.pdf.
- [6] Iksoo Chang. Sznajd sociophysics model on a triangular lattice ferro and antiferromagnetic opinion [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2001, 12(10): 1509-1512.
- [7] Elgazzar A S. Application of the sznajd sociophysics model to small-world networks [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2001, 12(10): 1537-1544.
- [8] Bernardes A T, Stauffer D, Kerécs J. Election results and the sznajd model on barabási network [J]. *Eur Phys J B*,

2002, 25: 123-127.

- [9] Sousa A O. Consensus formation on a triad scale-free network [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2004, 12(10): 1537-1544.
- [10] González M C, Sousa A O, Herrmann H J. Renormalizing sznajd model on complex networks taking into account the effects of growth mechanisms [J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2006, 49: 253-257.
- [11] Wang Wenxu, Wang Binghong, Hu Bo, et al. General dynamics of topology and traffic on weighted technological networks [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94: 188702.

(责任编辑:尹闯 邓大玉)