

基于坡道元胞自动机模型的能耗研究*

Investigation of the Energy Dissipation Based on Cellular Automatic Model of Slope

梁玉娟

LIANG Yu-juan

(河池学院物理与电子工程系,广西宜州 546300)

(Department of Physics and Electronics Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi, 546300, China)

摘要:针对上坡路段汽车需减小车速增大牵引力的现象,假定坡道倾度与车辆在坡道上的最大速度成反比,基于元胞自动机 NaSch 交通流模型建立包含有坡道的单车道元胞自动机模型,用数值模拟研究在周期边界条件下,坡道长度和倾度对交通流能耗的影响.结果表明:坡道长度和倾度对交通流能耗均有很大的影响,坡道长度越长、坡度越大,车速被限速越厉害,越容易产生交通拥堵,形成稳定的低速车流,因而对应的能耗值较小,所以尽可能地减少坡道的倾度和长度可以提高道路的通行能力.

关键词:坡道 交通流 元胞自动机 能耗

中图分类号:O550 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2011)01-0044-04

Abstract: The slope inclination is assumed to be inverse proportional to the maximum velocity from the phenomena that the vehicles must reduce the speed in order to increase the drag force in the up-slope section. Based on NaSch model, a cellular automaton model of slope for single-lane is proposed. The energy dissipation is investigated by numerical simulation with different up-slope length and up-slope inclination under the periodic boundary condition. The result delineates that the energy dissipation is significantly affected by up-slope length and inclination. The longer up-slope and the greater up-slope inclination, the greater speed limit is. Traffic jams and low-speed traffic flow are form and the corresponding energy dissipation value is small. So the capacity of road can be enhanced by reducing up-slope length and up-slope inclination.

Key words: slope, traffic flow, cellular automaton, energy dissipation

交通是国民经济的命脉,随着社会经济的快速发展,交通拥堵、交通事故、能源短缺、环境污染等交通相关问题已是困扰各国的世界性难题.就能源短缺而言,有研究表明,超过 20% 的原油消耗是由于交通堵塞及“时停时走”交通造成的^[1,2]. 国际能源机构统计

数据表明,2001 年全球 57% 的石油消费在交通领域,预计到 2020 年交通用油将占全球石油总消耗的 62% 以上.美国能源部预测,2020 年以后,全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口,2050 年的供需缺口几乎相当于 2000 年世界石油总产量的两倍^[2,3]. 交通能源是 21 世纪全球面临的重大挑战,交通问题已是近年来学者们研究的热点课题^[1~13],各种各样的交通流模型相继产生,其中元胞自动机模型规则简单、灵活可调、可以有效地在计算机上模拟各种各样真实的交通情况,因而在交通流的研究中得到广泛的应用和发展^[1,2,5~13]. 文献[8]利用元胞自动机模型研究高速公路存在坡道的交通流量和平均速度随车流密度的变化,提出通过增设爬坡道来提高道

收稿日期:2009-05-10

修回日期:2010-07-07

作者简介:梁玉娟(1968-),女,副教授,主要从事计算物理与非线性物理研究.

* 国家自然科学基金(批准号:10662002,10865001),国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB705500),广西区精品课程:力学项目(桂教高教[2007]111号、179号),广西教育厅(201010LX462,201012MS206)项目资助。

路的通行能力. 坡道是一种很常见的交通瓶颈, 本文利用元胞自动机模型研究在周期边界条件下坡道长度和倾度对交通流能耗的影响.

1 坡道模型及能耗公式

1.1 坡道模型及演化规则

道路一般都不只有一个坡道, 为简化问题, 我们设所研究路段为只含有一个坡道的单行车道. 采用周期边界条件, 整个道路交通系统是由长度为 L 的一维离散格点链构成, 每一个格点在每一时刻或为空或被一辆车占据. 用 v_{\max} 和 p 分别表示车辆的最大速度和随机延迟概率. 车辆功率一定的条件下, 牵引力与速度成正比, 假设在坡道前后, 车辆的最大速度为 $v_{\max 1}$, 在坡道上最大速度减小为 $v_{\max 2}$, $v_{\max 1} > v_{\max 2}$. 假定坡道倾度 S 跟车辆在坡道上的最大速度成反比, 即 $S = k/v_{\max 2}$, k 为比例系数. 令 $k = 1$, 则 $S = 1/v_{\max 2}$. 当 $v_{\max 1} = v_{\max 2}$, 有 $S = 1/v_{\max 1}$, 表示没有坡道的情况, $S = 1$ 是坡道倾度取最大值的情况^[8]. 在每一时步 $t \rightarrow t + 1$ 中, 所有车辆都按照如下的演化规则进行速度和位置的同步更新:

(0) 确定车辆的最大速度 v_{\max} : 当车辆处于坡道上, 车辆最大速度 $v_{\max} = v_{\max 2}$, 其它情况下, 车辆最大速度 $v_{\max} = v_{\max 1}$;

(1) 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(第 $n + 1$ 辆车)之间的空格数.

1.2 能耗公式^[2]

任何运动的物体都具有能量, 假设车辆的质量为 m , 当它的速度为 v 时, 其动能为 $mv^2/2$, 当车辆因某种原因减速时, 其动能将减少, 称减少的动能为能量消耗, 简称能耗. 用 $e(n, t)$ 表示第 n 辆车从 $t \rightarrow t + 1$ 时步的能耗:

$$e(n, t) = \begin{cases} \frac{m}{2} [v^2(n, t) - v^2(n, t + 1)], \\ v(n, t) > v(n, t + 1); \\ 0, v(n, t) \leq v(n, t + 1). \end{cases}$$

则单位时间内平均每辆车的能耗为:

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

其中 T 是统计的时间, N 是车道上的车辆总数, t_0 是驰豫时间. 车道上随着车辆密度的增加, 车辆之间相互作用增强, 如果车速的减小是因为车辆之间相互作用造成的限速, 则减少的动能称为相互作用能耗, 用 E_{d_i} 表示; 如果是因为路况、环境、气候、驾驶员驾驶习惯等因素造成的减速, 这样减少的动能称为随机减速能耗, 用 E_{d_r} 表示, 则总能耗为 $E_d = E_{d_i} + E_{d_r}$.

2 数值模拟及结果分析

数值模拟的实际道路长为 7.5km, 用 1000 个格子来表示, 相当于每个格子对应的实际路长度是 7.5m. 将 N 辆车随机地分布在 1000 个格点上, 采用周期边界条件, 则车道上车辆总密度为 $\rho = N/L$. 每一辆车的状态由其本身的速度 v 表示, $v \in [0, v_{\max}]$, 平路上取 $v_{\max} = v_{\max 1} = 5$, 对应的实际车速为 135km/h, 对于不同倾度的坡道 $v_{\max} = v_{\max 2} = 4, 3, 2, 1$, 对应实际车速为 108km/h、81km/h、54km/h、27km/h. 为简化问题, m 取单位 1^[2], 长度单位均以格点为单位做无量纲化处理. 演化时步为 50000, 为消除暂态的影响, 开始的 30000 时步对能耗 $e(n, t)$ 不进行统计, 统计后 20000 时步的能耗 $e(n, t)$ 并对时间求平均, 这样就得到每一次运行的平均能耗. 为消除随机性对结果的影响, 再对 10 个样本取平均, 即能耗图上的每一个点是 10 次运行的平均值. 图 1 是坡道最大速度为 $v_{\max 2} = 3$ 、坡道长度 $L = 80$ 的 3 种能耗 (E_{d_i} 、 E_{d_r} 、 E_d) 与密度 ρ 的关系图. 由图 1 可知, 3 种能耗都是随着密度的增大逐渐增大到最大值, 然后逐渐减小, 同一密度下, 随机减速能耗比相互作用能耗大.

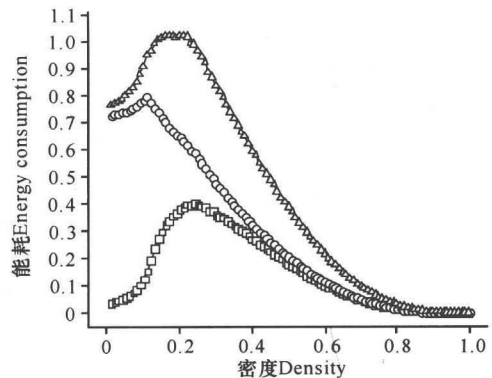


图 1 能耗与密度关系 ($v_{\max 1} = 5, v_{\max 2} = 3, p = 0.25, L = 80$)

Fig. 1 Relationship between the energy dissipation and the density ρ ($v_{\max 1} = 5, v_{\max 2} = 3, p = 0.25, L = 80$)
 \square - E_{d_i} ; \circ - E_{d_r} ; \triangle - E_d .

2.1 坡道长度对能耗的影响

假设车道上只有同一种类型的车辆,如快车.车道的平路部分取最大速度 $v_{\max 1}=5$,坡道部分最大速度取 $v_{\max 2}=2$,改变坡道的长度进行模拟,结果如图2所示.不同坡道长度,3种能耗 E_{d_i} 、 E_{d_r} 、 E_d 随密度的变化趋势与图1相似;大约 $\rho < 0.4$ 的小密度区域,3种能耗都随着 L 的增大而减小,这是因为小密度区域,车间距较大,相互作用小,司机一般都是追求以尽可能大的车速行驶,当坡道较短时,加减速的可能性增大,而当坡道较长时,慢车增多(处在坡道上的快车变成了慢车),司机比较谨慎,一般以较低速度行驶,因而 E_{d_i} 、 E_{d_r} 、 E_d 随 L 的增大而减小; $\rho > 0.4$ 的大密度区域,对应曲线都重合在一起,这是因为大于临界密度后的堵塞相,车辆相互影响较大,只要有车辆低速行驶,后面的车辆就要受到限制,形成低速的车流队伍.总之,坡道长度对3种能耗均有不同程度的影

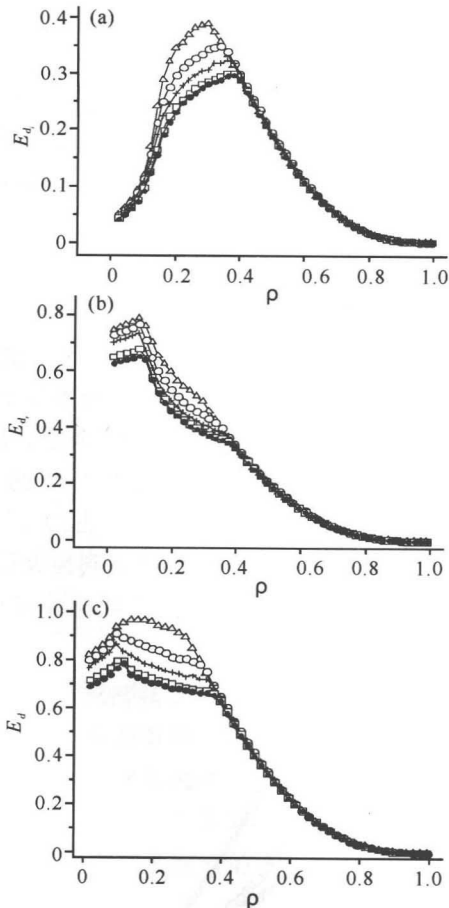


图2 不同坡道长度的能耗 (E_{d_i} 、 E_{d_r} 、 E_d) 与密度 ρ 的关系 ($v_{\max 1}=5, v_{\max 2}=2, p=0.25$).

Fig. 2 Relationship between the energy dissipation (E_{d_i} 、 E_{d_r} 、 E_d) and the density of vehicles ρ for different values L of ramp length ($v_{\max 1}=5, v_{\max 2}=2, p=0.25$).

(a) $E_{d_i} - \rho$; (b): $E_{d_r} - \rho$, (c) $E_d - \rho$.

\triangle : $L=10$; \circ : $L=20$; $+$: $L=40$; \square : $L=80$; \bullet : $L=100$.

响, L 对 E_{d_r} 的影响比对 E_{d_i} 的影响大得多, E_{d_r} 最大值大约是 E_{d_i} 最大值的两倍.

2.2 坡道倾度对能耗的影响

取 $v_{\max 2}=5, 4, 3, 2, 1$, 则 $S=1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1$, 其中 $S=1/5$ 是没有坡道的情况, $S=1$ 是坡道倾度取最大值情况, 模拟结果如图3所示. 由图3(a)可以看出: (1) 坡道倾度 $S=1/3$ 对应能耗 E_{d_i} 的最大值比坡度更小的 $S=1/4$ 和没有坡道 $S=1/5$ 的 E_{d_i} 最大值都大, S 再增大, E_{d_i} 最大值减小, $S=1$ 对应的 E_{d_i} 最大值最小; (2) 临界密度随着坡道倾度 S 的增大而增大; (3) 自由运动相, 车辆之间的相互作用小, 车速大, 只要车速小于前一时刻的车速, 能耗就增加, 因而 E_{d_i} 随车流密度 ρ 的增大而增大到最大值; (4) 阻塞相, 因为随着车辆的增多, 车辆之间相互作用增大, 车速受到很大的限制, 车辆之间保持相对恒定的低速运动, 所以 E_{d_i} 随 ρ 的增大而减小; (5) $S=1$ 能耗很小,

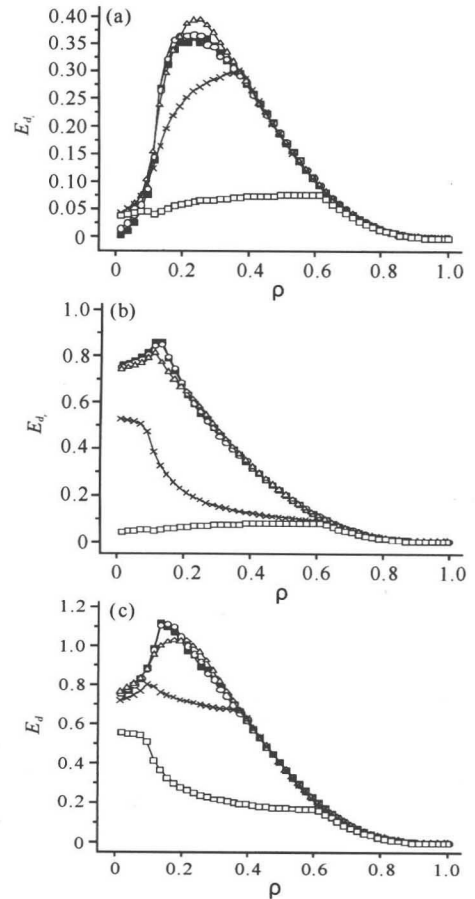


图3 不同坡道倾度下系统能耗 (E_{d_i} 、 E_{d_r} 、 E_d) 与密度 ρ 的关系 ($L=80, p=0.25$).

Fig. 3 Relation of the the energy dissipation (E_{d_i} 、 E_{d_r} 、 E_d) and the density of vehicles ρ for different values S of the inclination of the ramp ($L=80, p=0.25$).

(a) $E_{d_i} - \rho$; (b): $E_{d_r} - \rho$, (c) $E_d - \rho$.

\blacksquare : $S=1/5$; \circ : $L=1/4$; \triangle : $s=1/3$; \times : $S=1/2$; \square : $S=1$.

因为坡度很大,坡道上车辆速度很小,最大速度 $v_{\max 2} = 1$, 即 27km/h, 密度稍大,后面的车辆依次受到很大的限制,保持稳定的低速车流,因而对应 E_{d_r} 很小.

由图 3(b)可以看出:(1)随机减速能耗 E_{d_r} 最大值比相互作用能耗 E_{d_i} 最大值大一倍左右;(2)当 $S = 1/5 \rightarrow S = 1/2$ 时,出现 E_{d_r} 最大值的临界值随坡度 S 的增大而减小;(3)当 $S = 1/3 \rightarrow S = 1/5$ 时,随 ρ 的增大, E_{d_r} 逐渐增大到最大值,然后逐渐减小,大约 $\rho < 0.145$,同一密度,坡度越小对应的 E_{d_r} 越大;(4)较大的坡度 $S = 1/2$,大约 $\rho < 0.1$ 的小密度范围, E_{d_r} 基本上保持一个平台,然后逐渐减小;(5)最大坡度 $S = 1$, E_{d_r} 值很小,随 ρ 的增大, E_{d_r} 变化很缓慢,坡道上游车速被限速得很厉害,车道上是稳定的低速车流,因而 E_{d_r} 变化不大.

由图 3(c) 可看出:(1)对应坡度 $S = 1/5, S = 1/4, S = 1/3, S = 1/2$,随 ρ 的增大, E_d 逐渐增大到最大值,然后逐渐减小,且对应较大坡度 $S = 1/2, 0.1 < \rho < 0.4$, E_d 减小较缓慢, $\rho > 0.4$ 时 E_d 减小的速度更快;(2)对应最大坡度 $S = 1$,大约 $\rho < 0.1$ 的小密度范围, E_d 基本上保持一个平台, $0.1 < \rho < 0.6$, E_d 减小较缓慢, $\rho > 0.6$ 时 E_d 减小较快.

3 结束语

本文在 NaSch 交通流模型基础上,采用周期边界条件,通过计算机数值模拟,研究了具有不同长度、不同倾度的坡道对交通流能耗的影响.模拟结果表明:坡道长度和倾度对交通流能耗均有很大的影响,坡度越大,车辆被限速就越厉害;坡道越长,车辆被限速的时间就越长,如果遇到大坡、长坡,车辆密度稍大就会形成低速车流,坡道上游路段的快车只能跟随行驶,因而对应的能耗值(动能损失)就小,说明司机在大坡、长坡路段的驾驶更加谨慎,保持低速行驶,交通流量降低.因而尽可能地减少坡道的倾度和长度可以提高道路的通行能力.

致谢:

感谢广西大学物理科学与工程技术学院薛郁教授的指导及其基金项目的资助.

参考文献:

- [1] Helbing D. Fundamentals of traffic flow[J]. Physical Review E, 1997, 55(3): 3735-3738.
- [2] 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.
- [3] 欧阳明高.我国节能与新能源汽车技术发展策略与对策[J].中国科技产业,2006(2): 8-13.
- [4] 李彬,运伟国.带坡度的山区公路弯道处汽车行驶安全性研究[J].公路与汽运,2007(6): 52-55.
- [5] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I France, 1992(2): 221-2229.
- [6] 肖世发,刘幕仁,孔令江.高速桥梁瓶颈模型属性的研究[J].物理学报,2006,55(7): 3328-3335.
- [7] 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.
- [8] 李盛春,孔令江,刘幕仁.高速公路坡道对交通流的影响[J].广西科学,2008,15(1): 47-51.
- [9] Pan Jiaxiu, Xue Yu, Liang Yujuan, et al. Effect of road structure on the capacity of a signalized road intersection [J]. Chinese Physics B, 2009, 18(10): 4169-4176.
- [10] 钱勇生,汪海龙,王春雷考虑公交港湾式停靠的多速混合城市交通流元胞自动机模型研究[J].物理学报, 2008, 57(4): 2115-2120.
- [11] 梁玉娟,盘佳秀,薛郁.公交车站及停靠时间对混合交通流的影响[J].广西物理,2009,30(1): 8-12.
- [12] 贾斌,李新刚,姜锐,等.公交车站对交通流影响模拟分析[J].物理学报,2009,58(10): 6845-6851.
- [13] 梁玉娟,薛郁.道路弯道对交通流影响的研究[J].物理学报,2010,59(8): 5325-5331.

(责任编辑:韦廷宗)