

混合交通流元胞自动机 FI 模型的能耗研究*

温 坚¹⁾²⁾ 田欢欢²⁾ 康三军¹⁾ 薛 郁^{1)†}

1) (广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

2) (玉林师范学院物理与信息科学系, 玉林 537000)

(2010 年 1 月 7 日收到; 2010 年 2 月 7 日收到修改稿)

研究了在周期边界条件下, 最大速度、混合比例、车辆长度、随机减速概率对 (fukui-ishibashi, FI) 交通流模型能耗的影响. 数值模拟结果表明, FI 交通流模型的能耗随着车辆最大速度的增大而增加; 随着混合比 C 的增大而增加, 长车的比例越多能耗越大; 随长车车长的增长而增加. FI 交通流模型的能耗不同于 NaSch 模型能耗, 对于 FI 交通流模型, 在最大流量之处交通能耗发生下降的突变趋于零, 其左右各存在交通能耗极大值.

关键词: 交通流, 元胞自动机, FI 模型, 能耗

PACC: 0550, 0520

1. 引 言

随着社会经济的发展, 交通阻塞引起的环境污染和能耗问题越来越严重. 研究表明超过 20% 的原油消耗和空气污染是由于交通堵塞及“时停时走”交通引起的^[1]. 车辆排出的 SO_2 , NO_x , CO , CO_2 等有害物质甚至超过工业污染, 严重危害人类的身体健康^[2]. 研究发现, 车辆速度由 40 km/h 减小到 10 km/h, 燃料消耗将增加 2—4 倍^[3]. 因此, 为了改进人类生活的质量, 减少交通阻塞是非常重要的. Nakayama 等首先提出在外界小扰动条件下车流附加能耗的估算方法^[4], Shi 等^[5]对分析了几种典型跟驰模型的稳定性与附加能耗的关系, Zhang 等^[6,7]研究了元胞自动机确定性 NaSch 模型和非确定性 NaSch 模型能耗的问题以及边界效应的影响, 田欢欢等^[8]考虑车长、最大速度和延迟概率的不同影响, 研究了元胞自动机混合交通流的能耗问题, 王涛等^[9]、Toledo 等^[10]分别研究了跟驰模型、城市交通模型的能耗问题.

由于在交通流中发现了非平衡相变以及很多非线性现象, 引起许多科学家对该领域的研究产生很大的兴趣^[2,3], 在理论上提出了各种交通流模型, 如交通流体动力学模型、动力论模型、跟驰模型和

元胞自动机模型等^[2,3,11,12]. 其中元胞自动机 (CA) 模型是一种时间、空间和状态变量均离散的模型, 由于其算法简单、易于并行计算, 适于计算机的大规模仿真, 能有效模拟交通中车辆的运动, 因此, 在交通流中元胞自动机模型得到了广泛的研究和应用^[2,3,13]. 最著名的元胞自动机交通流模型是 Nagel 和 Schreckenberg 于 1992 年提出的随机 NaSch 模型^[14]. 在 NaSch 模型的基础上, 人们提出了许多改进的模型, 典型的如 TT, BJH, VDR 和 FI 模型等^[15-18], 汪秉宏等^[19,20]通过车间距来确定车辆下一时步的速度, 成功地得到 FI 模型的解析解.

本文通过混合交通流元胞自动机 FI 模型的能耗研究, 研究最大速度、车辆长度、混合比例以及随机减速概率对交通能耗的影响, 探讨 FI 模型能耗的特性, 寻找低能耗的交通模型.

2. FI 模型和能耗

FI 模型是将道路视为长度为 L 的一维离散格点链, 每一时刻, 格点上可能被一辆车占据或没有车辆占据. 用 $x(i, t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻的车头位置, 其与前方紧邻车辆 ($i+1$) 之间的间距为 $\text{gap}(i, t) = x(i+1, t) - x(i, t) - \text{Length}(i)$, 其中 $\text{Length}(i)$ 表示第 i 辆车的车长. 所有车辆状态演化规则

* 国家自然科学基金 (批准号: 10865001, 10662002), 国家重大基础研究基金 (批准号: 2006CB705500), 广西研究生创新计划 (批准号: 105930903077) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yuxuegu@gxu.edu.cn

如下:

1) 车辆 $t+1$ 时步的速度更新:

如果 $(v_{\max} \leq \text{gap}(i, t))$, 则 $v(i, t+1)$

$$= \begin{cases} v_{\min}, & \text{概率 } 1-p, \\ \min(v_{\max}-1, 0), & \text{概率为 } p; \end{cases}$$

否则, $v(i, t+1) = \text{gap}(i, t)$.

2) 车辆 $t+1$ 时步的位置更新: $x(i, t+1) \rightarrow x(i, t) + v(i, t+1)$.

其中每一辆车速度为 $v(i, t)$ ($v(i, t) \in [0, v_{\max}]$, $i \in [1, L]$, v_{\max} 是最大速度).

用 $e(i, t)$ 表示第 i 辆车从 t 到 $t+1$ 时刻的能耗, 表示为

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

其中 $mv^2/2$ 为每一辆车的动能, m 为该车辆的质量, 在方程(1)中, 车辆动能的减小定义为车辆的能耗, 用 E_d 表示单位时间内每辆车的平均能耗, 用公式表示为^[6-8]

$$E_d = \frac{1}{T} \frac{1}{N} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \sum_{i=1}^N e(i, t), \quad (2)$$

式中 N 为道路上车辆总数, t_0 是弛豫时间, 用 E_{di} 表示由于车辆间确定减速引起的能耗, 称为确定能耗, 随机能耗 E_{dr} 表示随机减速引起的能耗, 则总平均能耗 $E_d = E_{di} + E_{dr}$.

3. 数值模拟及结果分析

在模拟时, 采用周期边界条件, 选取道路长度 $L = 10^4$, 样本数取 30. 车道上车辆总数为 N , 总密度为 $\rho = N/L$; 若其中的短车数量为 N_s , 则其车道占用率 $C_s = N_s \times L_s/L$, 即短车所占据的格点数占车道长的比值; 若长车数量为 N_L , 则其车道占用率 $C_L = N_L \times L_L/L$, 即长车所占据的格点数占车道长的比值. 因此, 车道总占用率(所有车辆所占据的格点数与车道长度的比值)为 $C = C_s + C_L = (N_s \times L_s + N_L \times L_L)/L$. 用混合比例系数 C_n 来度量车辆的混合程度, $C_n = C_L/C$, 即是长车的占用率与总占用率的比值, 则 $C_s = (1 - C_n)C$, $C_L = C_n \times C$, 密度 $\rho = C[(1 - C_n)/L_s + C_n/L_L]$. 本文长度单位均以格点为单位, 采用无量纲化计算. t_0 是弛豫时间 $t_0 = 10^4$, 统计时步 $T = 10^4$, 单一车辆质量 $m = 1$.

3.1. 最大速度的影响

首先, 取 $L_s = L_L = 1$, 道路上只有一种长度的车辆在行驶. 图 1(a) 给出不同最大速度时, E_d 与密度

ρ 的关系. 从图中可以看出, 开始能耗随着密度的增加逐渐增大, 然后减小, 当在流量达到最大对应的密度时, 能耗减小到最小, 然后又增大到某个最大值, 最后逐渐减小为 0. 随着最大速度 V_{\max} 的增大, 能耗减小到最小时的密度减小, 能耗的最大值增大, 而且其对应的密度左移. 图 1(b) 是最大速度 $V_{\max} = 7$ 时, 能耗 E_d , E_{di} , E_{dr} 以及流量 Q 与密度 ρ 的关系. 从图中可以发现, 在密度 $\rho_d = 1/v_{\max} \approx 0.14$

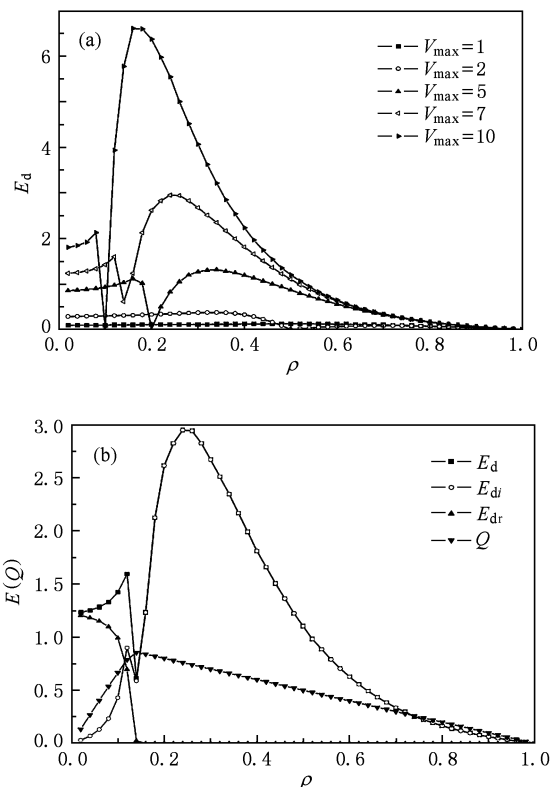


图 1 (a) 当不同最大速度时, 总平均能耗 E_d 与密度 ρ 的关系; (b) 当 $V_{\max} = 7$ 时, E_d , E_{di} , E_{dr} 与密度 ρ 的关系及其基本图. 其中 $\text{Length-I} = 1$, $\text{Length-II} = 1$, $p = 0.25$

处,在对应于最大流量的地方,交通能耗发生下降的突变,其原因在于从该处开始,由于车辆之间的车间距小于车辆的最大速度,随机减速能耗 E_{dr} 减小为 0, 交通能耗由确定减速来决定;在密度 $\rho < 1/v_{max}$ 和 $\rho > 1/v_{max}$ 区域,交通流能耗各存在一个最大值,FI 模型总的平均能耗与 NaSch 模型有显著的不同^[6,8]. 从图 2 可以证实这一点. 图 2 是当不同最大速度时,确定能耗 E_{di} 和随机能耗 E_{dr} 随密度 ρ 的变化图,其中 $Length-I = Length-II = 1, p = 0.25$.

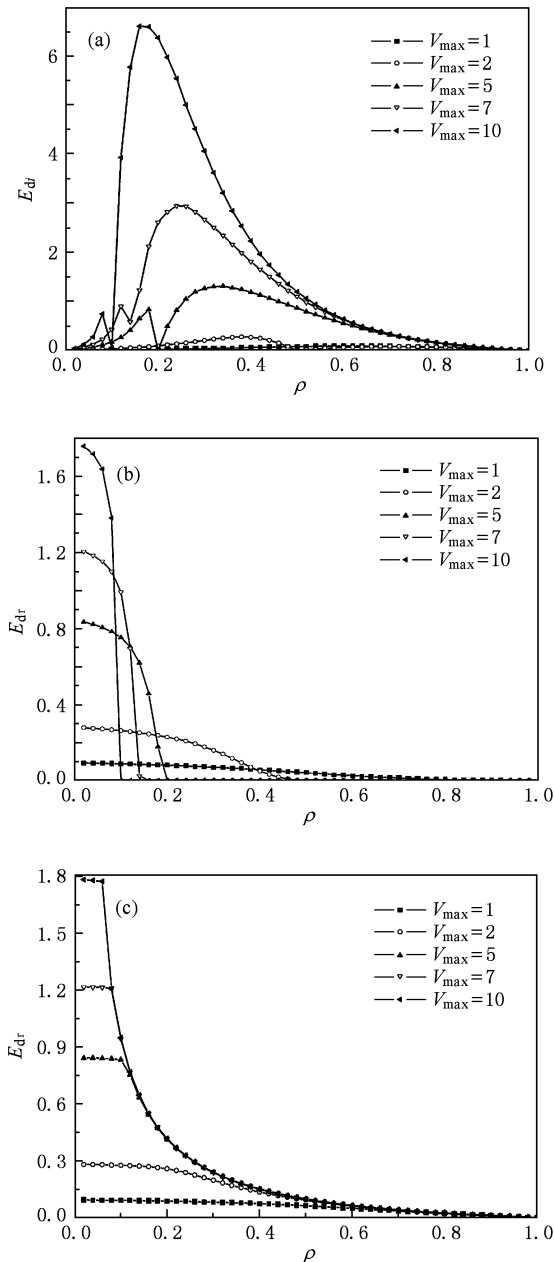


图 2 (a) 当不同最大速度时,确定能耗 E_{di} 与密度 ρ 的关系; (b) 当不同最大速度时,随机能耗 E_{dr} 与密度 ρ 的关系; (c) 是对应的 NaSch 模型随机能耗 E_{dr}

从图 3(a)可以看出,能耗 E_{di} 随着密度 ρ 的增大而增大,然后减小为 0. 随着最大速度 V_{max} 的增大,能耗 E_{di} 的最大值对应的密度减小. 图 3(b) 显示能耗 E_{dr} 随着密度 ρ 的增大减小到 0, 然后保持不变. 随着最大速度 V_{max} 的增大,能耗突变下降的密度 $\rho_d = 1/v_{max}$ 减小,随机减速能耗 E_{dr} 减小为 0 的临界密度左移,确定减速能耗 E_{di} 最大值对应的密度减小. 图 3 (c) 显示在相同条件下 NaSch 模型的随机能耗 E_{dr} 与密度 ρ 的关系,图中很容易看出,NaSch 模型的能耗在最大速度增大时,不随着密度 ρ 的增大减小到 0, 这显著不同于 FI 模型的随机能耗. 而后面将看到,FI 模型的随机能耗为 0, 恰好是随机减速过程不起作用,而车辆又没有确定减速,使得车流能耗在密度 $\rho_d = 1/v_{max}$ 处能耗最小.

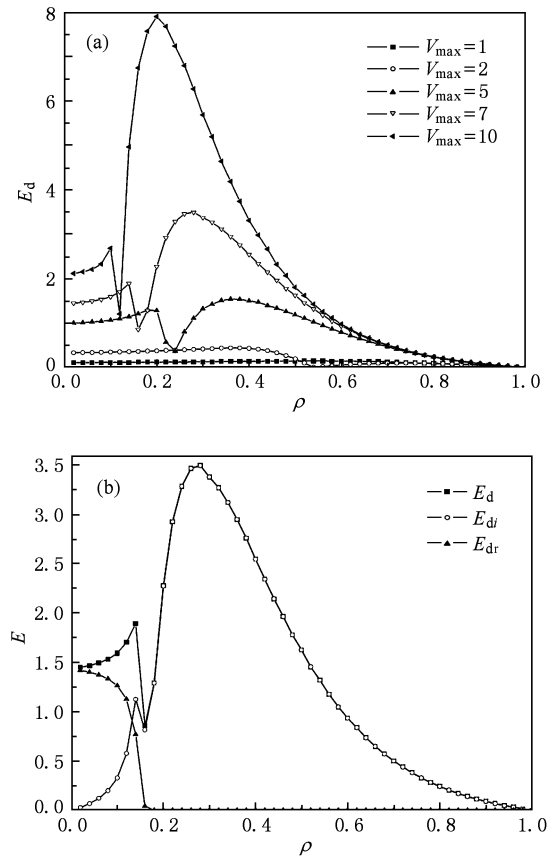


图 3 (a) 不同最大速度时, E_d 与占有率 C 的关系; (b) 当 $V_{max} = 7$ 时, E_d, E_{di}, E_{dr} 与密度 ρ 的关系及其基本图. $Length-I = 1, Length-II = 2, p = 0.25$

3.2. 混合比例对混合交通能耗的影响

为了研究混合比例对由不同车辆长度的车辆组成的混合交通流能耗的影响,图 3 是混合比例 C_n

= 0.3 时,在不同最大速度时,总的平均能耗 E_d 与占有率 C 的关系图,其中 Length-I = 1, Length-II = 2, $p = 0.25$. 从图中可以看出,长短车混合时,总的平均能耗 E_d 的变化趋势与单一车长时的相同. 为了使车辆长度效应显著,必须加大车辆的长度.

图 4 是由短车车长 Length-I = 1, 长车车长 Length-II = 10, 最大速度 $V_{max} = 2$ 的车辆组成的混合交通流,在不同混合比例 C_n 时,总平均能耗 E_d 与占有率 C 的变化关系图. 从图中可以看出,总平均能耗 E_d 随着占有率 C 增大缓慢增大到一个最大值,再突然减小趋向于 0,然后再随着占有率 C 逐渐增大到另一个最大值,最后减小为 0,这与考虑单一车长时的情况相同,在. 随着混合比例 C_n 的增加,总平均能耗 E_d 达到最大值时的占有率右移. 图 5 是混合比例 $C_n = 0.7$, 能耗 E_d, E_{di}, E_{dr} 与占有率 C 的变化关系及其基本图. 其中 $p = 0.25$, Length-I = 1, $V_{max} = 2$, Length-II = 10.

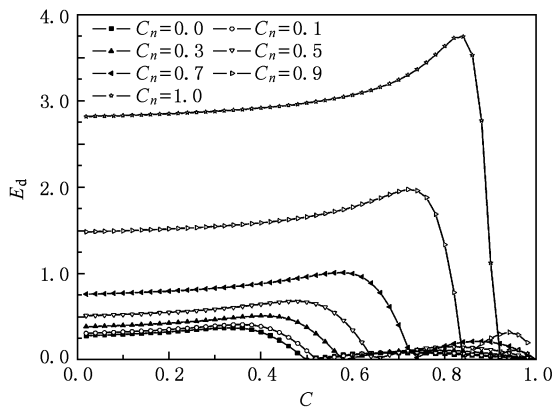


图 4 对于不同混合比例 C_n , 能耗 E_d 与占有率 C 的变化关系, 其中 $p = 0.25$, Length-I = 1, Length-II = 10, $V_{max} = 2$.

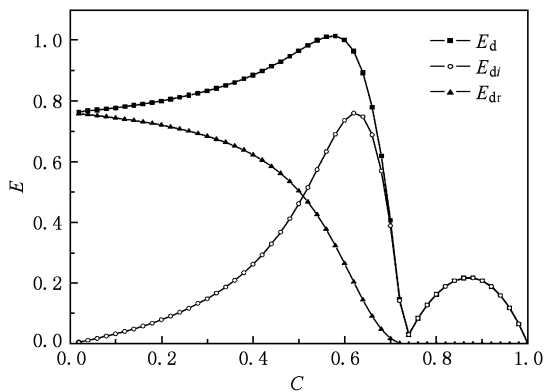


图 5 混合比例 $C_n = 0.7$, 能耗 E_d, E_{di}, E_{dr} 与占有率 C 的变化关系, 图中 $p = 0.25$, Length-I = 1, $V_{max} = 2$, Length-II = 10

图 6 是对于不同的混合比例 C_n , 能耗 E_{di}, E_{dr} 与占有率 C 的关系. 其中短车车长 Length-I = 1, 长车车长 Length-II = 10, 最大速度 $V_{max} = 2$, 随机减速概率 $p = 0.25$. 图 6(a) 表明得到, 能耗 E_{di} 随着占有率 C 增大先缓慢增大到最大, 再快速减小为趋于 0 的某个值, 然后再逐渐增大到某个较大值, 最后减小为 0. 随着混合比例 C_n 的增加, 能耗 E_{di} 达到最大值时的占有率右移. 图 6(b) 表明得到, 能耗 E_{dr} 随着占有率 C 增大先缓慢减小到 0, 然后保持不变. 随着混合比例 C_n 的增加, 能耗 E_{dr} 减小为 0 时的占有率增大.

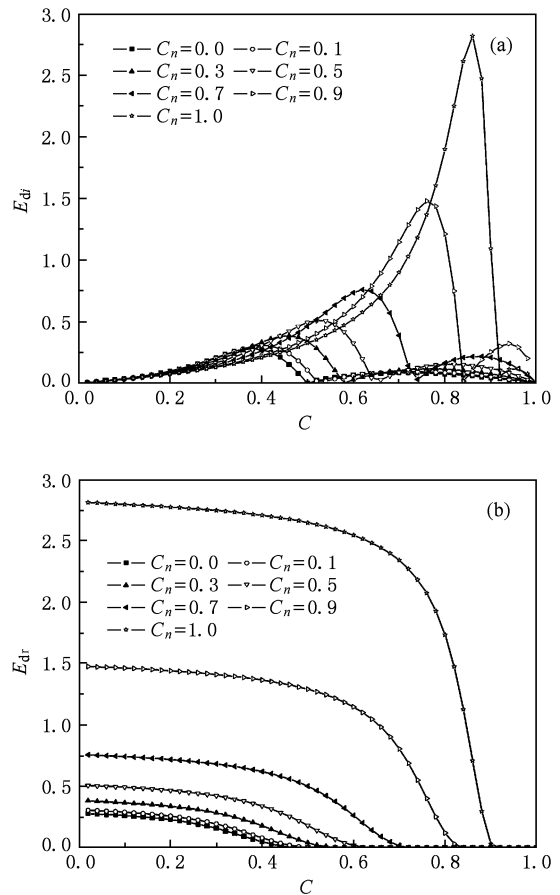


图 6 对于不同混合比例 C_n , 能耗 E_{di}, E_{dr} 与占有率 C 的变化关系, 其中 $p = 0.25$, Length-I = 1, Length-II = 10, $V_{max} = 2$ (a) 能耗 E_{di} 与占有率 C 的变化关系; (b) 能耗 E_{dr} 与占有率 C 的变化关系

3.3. 车长对混合交通能耗的影响

混合交通中车辆长度对交通起到很大的影响, 为研究车辆长度对混合交通能耗的影响, 取短车和长车的最大速度均为 $V_{max} = 2$. 图 7(a) 由模拟给出

了不同长车长度 Length-II 时,平均总能耗 E_d 与占有率 C 的关系图. 从图中可以看出,平均总能耗 E_d 随着占有率 C 的增大,先逐渐增大到最大值,然后减小到某一个趋于 0 的值,然后有增大到一个较大值,最后减小为 0. 为了深入研究 FI 模型能耗的特性,引入随机减速和确定减速的动能减小的车辆分布^[21,22],其定义为

$$f_{s(d)} = \frac{1}{T} \frac{1}{N} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} n_{s(d)},$$

其中 $n_{s(d)}$ 是在 T 时间内总随机(确定)减速车辆数. 数值模拟可以得出随机(确定)减速动能减小的车辆分布 $f_{s(d)}$ 图 7(b), 图中可以看出,在占有率 $C_r \approx 0.58$ 处,没有车辆随机减速,而恰好对应的车辆又

没有确定减速,使得车流能耗最小,而在占有率 $C > C_r$ 后,只有确定减速车辆起作用,开始增大再减小,使得能耗的变化对应图 7(a) 所示.

图 8 所示当不同长车车长 Length-II 时,确定能耗 E_{di} 和随机减速 E_{dr} 分别与占有率 C 的变化关系图. 图 8(a) 图表明能耗 E_{di} 随着占有率 C 的增大,先逐渐增大到最大,然后减小到某一个趋于 0 的值,然后再增大到一个较大值,最后减小为 0. 并且随着长车车长 Length-II 的增加,能耗 E_{di} 的最大值增大. 图 8(b) 表明能耗 E_{dr} 随着占有率 C 的增大,逐渐减小为 0, 然后保持不变. 图 7, 图 8 说明随着占有率 C 的增大,确定能耗对车流能耗起决定作用.

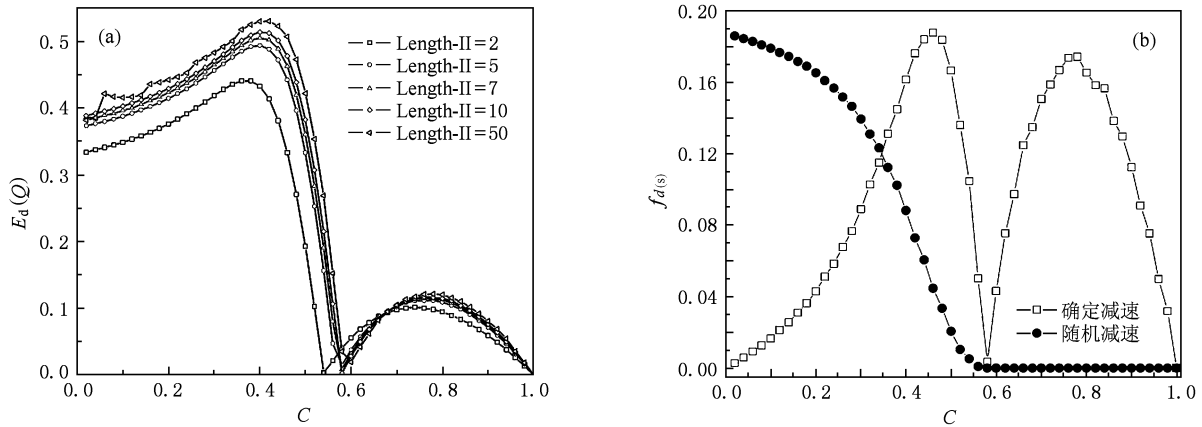


图 7 (a) 对于不同长车车长 Length-II 时,能耗 E_d 与占有率 C 的变化关系,其中 $p=0.25$, Length-I = 1, 混合比 $C_n = 0.3$, $V_{max} = 2$; (b) 在相同条件下,随机减速和确定减速的动能减小的分布图

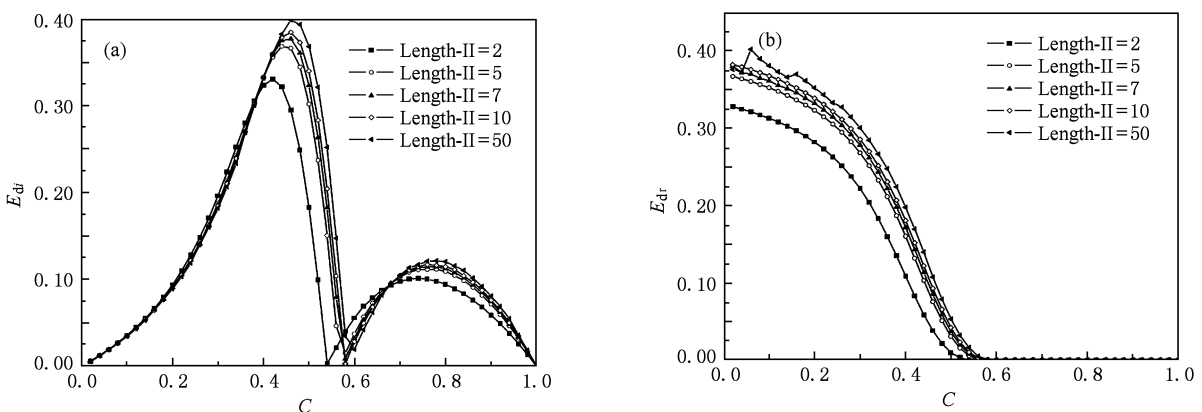


图 8 对于长车的车长 Length-II 不同时,能耗 E_{di} , E_{dr} 与占有率 C 的变化关系图,其中 $p=0.25$, Length-I = 1, $C_n = 0.3$, $V_{max} = 2$ (a) 能耗 E_{di} 与占有率 C 的变化关系; (b) 能耗 E_{dr} 与占有率 C 的变化关系

3.4. 随机减速概率 p 对能耗的影响

将讨论随机减速概率 p 对 FI 交通流模型的能

耗的影响. 图 9(a) 和(b) 通过模拟得出了不同随机减速概率 p 时,平均总能耗 E_d 与占有率 C 的关系图. 从图中可以发现,当 $p=0.0$ 时,此时为确定性 FI

模型,平均总能耗 E_d 随着占有率 C 的增加,当占有率 C 小于 0.2 时,平均总能耗 E_d 为 0;当占有率 C 大于 0.2 时,能耗 E_d 逐渐增加到最大值,然后再逐渐减小为 0. 当随机减速概率 $0 < p < 0.5$ 时,平均总能耗 E_d 随着占有率 C 的增大,逐渐增加到较大值,然后逐渐减小,在占有率 $C \approx 0.26$ 减小到最小值,当流量达到最大时,能耗 E_d 增大至最大值,然后逐渐减小为 0;当随机减速概率 $p = 0.5$ 时,在图 9(b) 中平均总能耗 $E_d \approx 0.51$ 保持不变,然后逐渐减小,在占有率 $C \approx 0.26$ 减小到最小值,当对应的流量达到最大时,能耗 E_d 增大到最大值,然后再逐渐减小为 0;当 $0.5 < p < 1$ 时,能耗 E_d 先逐渐减小,当流量达到最大时,能耗 E_d 增大至最大值,再逐渐减小为 0;当 $p = 1.0$ 时,为确定性 FI 模型,能耗 E_d 随占有率逐渐增加到某个较大值,再逐渐减小,当流量达到最大时,相应能耗 E_d 达到最大,以后逐渐减小为 0.

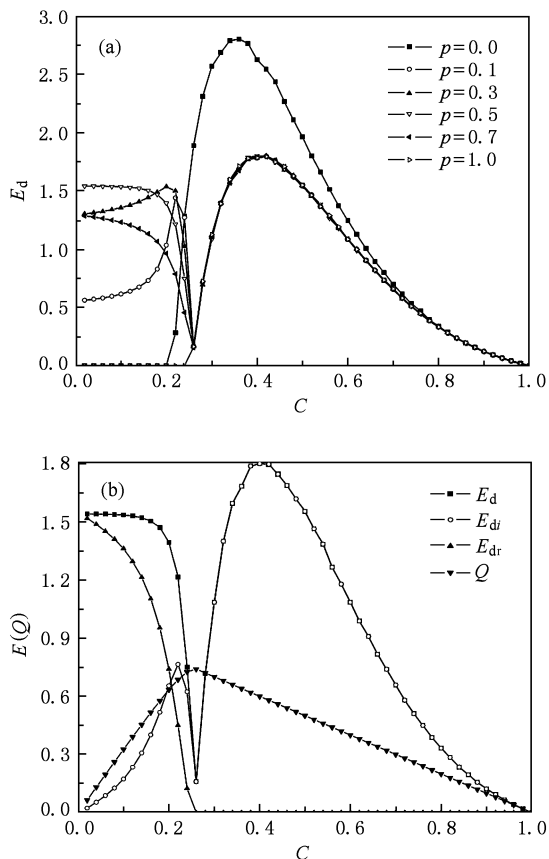


图 9 (a) 对不同的随机减速概率 p , 平均总能耗 E_d 与占有率 C 的关系,其中 Length-I = 1, Length-II = 10, $C_n = 0.3$, $V_{\max} = 5$; (b) 减速概率 $p = 0.5$, 能耗 E_d , E_{dr} , E_{dr} 与占有率 C 的变化关系图及对应的基本图,其中 Length-I = 1, Length-II = 10, $C_n = 0.3$, $V_{\max} = 5$

图 10 是不同的随机减速概率 p 时,确定 E_{di} 和随机能耗 E_{dr} 与占有率 C 的变化关系图. 在图 10 (a) 中,当 $p = 0.0$ 和 1.0 时,对应确定性 FI 模型,能耗 E_{di} 保持为 0,当占有率增大到某一值 C_r 时,能耗 E_{di} 开始增大至最大,对 $p = 0.0$ 时 $C_r \approx 0.2$ 小于 $p = 1.0$ 时的 $C_r \approx 0.26$,而 $p = 0.0$ 时的能耗 E_{di} 的最大值比 $p = 1.0$ 时的大. 当 $p > 0.0$ 且 $C \geq 0.26$ 时,能耗 E_{di} 曲线重合在一起;当 $p < 1.0$ 且 $C < 0.26$ 时,能耗 E_{di} 随占有率 C 逐渐增加到某一较大值,然后逐渐减小, p 越小,能耗 E_{di} 的较大值越大. 图 10(b) 是随机能耗 E_{dr} 与占有率 C 的变化关系图. 当 $p = 0.0$ 和 1.0 时, $E_{dr} = 0$. 当 p 取其它值时,能耗 E_{dr} 逐渐减小,在占有率 $C \geq 0.26$ 时减小为 0.

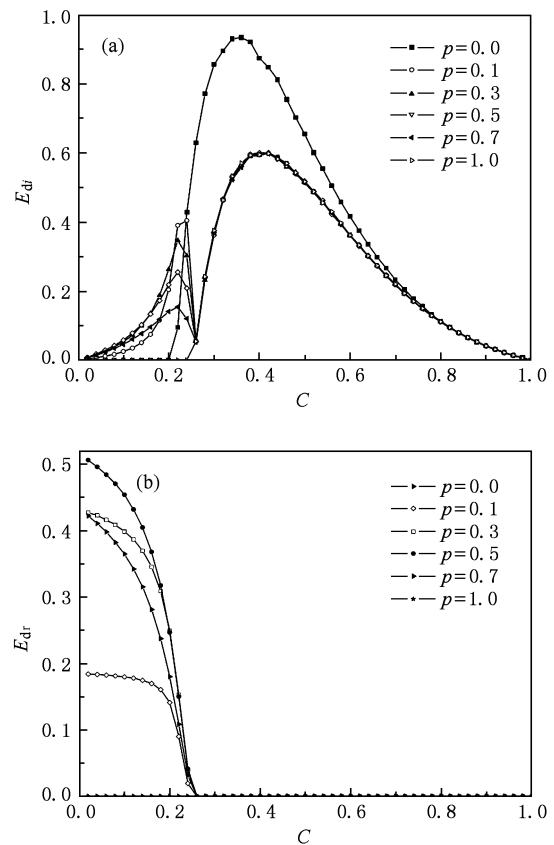


图 10 对于不同的随机减速概率 p , 能耗 E_{di} , E_{dr} 与占有率 C 的变化关系,其中 Length-I = 1, Length-II = 10, 混合比 $C_n = 0.3$, $V_{\max} = 5$ (a) 确定能耗 E_{di} 与占有率 C 的变化关系;(b) 随机能耗 E_{dr} 与占有率 C 的变化关系

4. 结 论

本文研究了在周期边界条件下,最大速度、混合比例、车辆长度、随机减速概率对 FI 交通流模型

能耗的影响. 数值模拟结果表明, 在车辆长度不变时, FI 交通流模型的能耗随着车辆最大速度的增大而增加; 在由车辆最大速度相同、车辆长度不同的混合交通流中, FI 交通流模型的能耗随着混合比 C 的增大而增加, 也即是长车的比例越大能耗越大; 在由车辆最大速度相同、长短车混合比例相同时, FI

交通流模型的能耗随着长车车长的增大而增加. 该结论与混合交通流 NaSch 模型能耗的趋势相同^[8], 而 FI 交通流模型的能耗与 NaSch 模型能耗有所不同, 对于 FI 交通流模型, 在最大流量之处交通能耗发生下降的突变趋于零, 其左右存在交通能耗极大值.

-
- [1] Helbing D 1997 *Phys. Rev. E* **55** 3735
- [2] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
- [3] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [4] Nakayama Y, Sugiyama Y, Hasebe K 2002 *Phys. Rev. E* **65** 016112
- [5] Shi W, Xue Y 2007 *Physica A* **381** 399
- [6] Zhang W, Zhang W, Yang X Q 2008 *Physica A* **387** 4657
- [7] Zhang W, Zhang W, arxiv: 0904.3727v2[physics. soc-ph]
- [8] Tian H H, Xue Y, Kang S J, Liang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4506 (in Chinese) [田欢欢、薛郁、康三军、梁玉娟 2009 物理学报 **58** 4506]
- [9] Wang T, Gao Z Y, Zhao X M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 634 (in Chinese) [王涛、高自友、赵小梅 2006 物理学报 **55** 634]
- [10] Toledo B A, Cerda E, Rogan J, Munoz V, Tenreiro C, Zarama R, Valdivia J A 2007 *Phys. Rev. E* **75** 026108
- [11] Helbing D, Hennecke A, Shvetsov V and Treiber M 2001 *Transp. Res. B* **35** 180
- [12] Nagatani T 2002 *Rep. Progr. Phys.* **65** 1331
- [13] Maerivoet S, Moor B D 2005 *Phys. Rep.* **419** 1
- [14] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221
- [15] Takayasu M, Takayasu H 1993 *Fractals* **1** 860
- [16] Benjamin S. C., Johnson N. F., Hui P. M 1996 *J. Phys. A* **29** 3119
- [17] Barlovic R, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 1998 *Eur. Phys. J. B* **5** 793
- [18] Fukui M, Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 1868
- [19] Wang B H, Wang L, Hui P M, Hu B 1998 20 *th IUPAP Inter. Conf. on Stat. Phys. Topic 2*, p145
- [20] Wang B H, Kuang L Q and Hui P M 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 906 (in Chinese) [汪秉宏、邝乐琪、许伯铭 1998 物理学报 **47** 906]
- [21] Chen Y H, Xue Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2750 (in Chinese) [陈燕红、薛郁 2004 物理学报 **53** 2750]
- [22] Xue Yu, Chen Y H, Kong L J 2004 *Int. J. Mod. Phys. C* **15** 721

Study on the energy consumption of cellular automaton FI model for mixed traffic flow *

Wen Jian¹⁾²⁾ Tian Huan-Huan²⁾ Kan San-Jun¹⁾ Xue Yu^{1)†}

1) (*Institute of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 53004, China*)

2) (*Department of Physics and Information Science, Yulin Normal University, Yulin 537000, China*)

(Received 7 January 2010; revised manuscript received 7 February 2010)

Abstract

Based on the Fukui-Ishibashi model (FI model), the energy consumption in the mixed traffic flow is investigated via considering three factors: maximum velocity, length of vehicle, and the ratio of the mixed traffic flow. Simulations and analyses indicate that the energy consumption of the mixed traffic flow with the same length and different maximum velocities is related to the slow maximum velocity and its ratio. The slower the maximum velocity and its ratio, the more energy will be consumed. Moreover, for the mixed traffic flow with the same maximum velocity and different lengths of vehicle, the energy consumption is related to the ratio of mixed vehicles. Longer vehicles induce more energy consumption. For a mixed traffic flow with the different maximum velocities and lengths of vehicle, its energy consumption is determined by the ratio of the mixed vehicles and delay probability p . The energy consumption of FI model drops off suddenly and trends to zero at the maximum flow rate, where there exists a maximum peak, which is significantly different from the result from the NaSch model.

Keywords: traffic flow, cellular automaton, FI model, energy dissipation

PACC: 0550, 0520

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10865001, 10662002), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500) and the Graduate Student Innovative Foundation of Guangxi Zhuang Autonomous Region (Grant No. 105930903077).

† Corresponding author. E-mail: yuxuegxu@gxu.edu.cn