

自动巡航的混合交通系统的能耗*

朱留华[†] 郑容森 田欢欢 韦艳芳

(玉林师范学院物理与信息科学系, 玉林 537000)

(2010年6月24日收到; 2011年8月12日收到修改稿)

基于自动巡航控制的元胞自动机交通流模型, 研究了单车道上不同类型车辆的最大速度、混合比例、速度期望因子以及质量对混合交通系统的能耗影响. 通过计算机数值模拟, 得到了混合交通系统在不同参数下的能耗, 同时借助于平均场理论对其进行解析. 理论解析与数值模拟结果相一致.

关键词: 元胞自动机, 自动巡航控制, 混合交通, 能耗

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 05.50.+q

1. 引言

交通是国民经济的命脉, 对国民经济的发展起着基础性、支持性和服务性的作用, 其特点决定了交通运输业在提供客货输送服务时, 必然伴随着大量的能源消耗, 同时也会带来生态环境的负面影响. 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”的交通现象造成的^[1].

住房和城乡建设部提供的一份统计数据显示, 目前我国交通能源消耗已占全社会总能源消耗的 20%, 如不加以控制, 将达到总能源消耗的 30%, 超过工业能源消耗. 快速机动化带来了交通能源消耗的急剧上升. 近年来, 小汽车出行比例逐年增加, 使一些城市的交通结构出现了由公共交通向个体交通转化的趋势. 鉴于能源越来越稀缺且需求量越来越大的现实, 以及随着经济的发展, 交通能源消耗占总能源消耗的比例越来越大的现状, 因此分析现阶段混合交通系统的能耗就显得格外有意义.

1992年, 德国学者 Nagel 和 Schreckenberg 提出了著名的 NaSch 模型^[2]. 基于此模型许多学者又提出了多种混合交通流模型^[3-8]. 通过对车辆间相互作用机制的研究, 从而对交通拥堵问题及“时停时走”交通现象有了比较深入的了解^[9-13].

本文基于自动巡航控制的元胞自动机混合交

通流模型^[14], 研究了周期性边界条件下, 单车道上由两种长度、可分别以不同最大速度行驶的车辆构成的混合交通系统的能耗. 通过计算机数值模拟, 探究了不同类型车辆的最大速度、混合比例、速度期望因子以及质量对混合交通系统能耗的影响.

2. 模型

将道路视为一维离散格点链, 每一格点对应的实际道路长度为 7.5 m. 在每一时刻, 格点或者被两种长度不同的车辆所占据或者空置. 设短车占据 1 个格点, 其最大速度 $v_{1,\max} = 4$, 对应实际车速为 108 km/h; 设长车占据 2 个格点, 其最大速度 $v_{2,\max} = 4$, 对应实际车速同样为 108 km/h. 每种类型的车辆进行速度更新时不能超过自身的最大速度.

用 $x_{j,i}(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻的车尾位置, 其中 j 用来表示不同类型车辆占据的格点数, $j = 1$ 表示目标车辆为短车, $j = 2$ 表示目标车辆为长车. $d_{j,i}(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻与前方紧邻车辆间的空置格点数, 显然 $d_{j,i}(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - j$.

下面给出具有自动巡航控制系统的车辆演化规则^[14].

首先确定补偿概率. 若满足条件 $w_j d_{j,i}(t) < v_{j,\max}$, 则速度负补偿概率为

$$p = \lceil w_j d_{j,i}(t) \rceil - w_j d_{j,i}(t),$$

* 国家自然科学基金(批准号:10762005, 11047003)、广西壮族自治区教育厅科研计划(批准号:200807LX401, 200607LX079)和玉林师范学院青年科研基金(批准号:2009YJQN25)资助的课题.

[†] E-mail: zhuliuhua421@sina.com

否则, $p = 0$ 不进行速度负补偿.

(1) 速度更新过程,

$$v_{j,i}(t + 1/2) = \min(v_{j,\max}, \lceil w_j d_{j,i}(t) \rceil).$$

(2) 以概率 p 进行的速度负补偿过程,

$$v_{j,i}(t + 1) = \max(v_{j,i}(t + 1/2) - 1, 0).$$

(3) 位置更新过程,

$$x_{j,i}(t + 1) = x_{j,i}(t) + v_{j,i}(t + 1).$$

规则中速度期望因子 $w_j \in (0, 1]$ 为预先设定的参数. 对于速度为 v_j 的车辆, 其动能为 $m_j v_j^2 / 2$, 其中 m_j 为目标车辆的质量, 用公式表示为 $m_j = k_j m_0$, 其中 k_j 为质量系数, m_0 为标准质量. 当车辆减速时, 车辆的动能减小, 导致能量耗散. 用 E_d 表示单位时间内每辆车的平均能耗.

定义第 i 辆车从 $t - 1$ 时刻到 t 时刻的能耗为^[15]

$$e_i(t) = \begin{cases} m_i [v_i^2(t - 1) - v_i^2(t)] / 2 & (v_i(t) < v_i(t - 1)), \\ 0 & (v_i(t) \geq v_i(t - 1)). \end{cases} \quad (1)$$

因此, 单位时间内每辆车的平均能耗 E_d 为

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

其中 N 为车道上的车辆总数, t_0 为弛豫时间, T 为统计时间长度.

3. 数值模拟结果与分析

模拟时设车道的长度为 L , 车道上的车辆总数为 N , 则车流的全局密度 $\rho = N/L$; 设短车数为 N_1 , 则短车对车道的占用率 $C_1 = N_1/L$; 同时设长车数为 N_2 , 则长车对车道的占用率 $C_2 = 2N_2/L$. 因此, 车道占用率 $C = C_1 + C_2 = (N_1 + 2N_2)/L$. 为了考虑车辆的混合程度, 引入混合比例系数 R , 设 R 为长车对车道的占用率与对车道的总占用率之比. 本文长度均以格点数为单位, 并取标准质量 $m_0 = 1$ ^[16].

模拟时采用周期性边界条件, 初始时刻, 两种不同类型的车辆按照混合比例系数 R 随机分布在车道上. 为消除暂态影响, 每次运行对最初的 $t_0 = 5 \times 10^4$ 时步不做统计. 以后 $T = 1 \times 10^4$ 时步进行时间平均, 这样就得到了每一次运行的结果. 为了减小初始分布对结果的影响, 取样本数为 30. 除图 2 外, 本文其他图中的数据点都是 30 个样本的平均值.

3.1. 车辆的最大速度对能耗的影响

图 1 反映了两种不同类型车辆的最大速度值相

同或相异时, 平均能耗 E_d 随占用率 C 的变化. 从图 1(a) 可以看出: 当两种不同类型的车辆最大速度相同时, 存在着一个临界占用率 C_c . 当占用率 C 低于临界占用率 C_c 时没有能量耗散; 当 C 高于临界占用率时, 平均能耗 E_d 先随占用率 C 的增加而增加, 但是平均能耗 E_d 达到峰值之后将随占用率 C 的增加而减小. 车辆的最大速度值越大, 临界占用率 C_c 越小, 平均能耗 E_d 的峰值越大.

观察图 1(b) 可以发现: 当两种不同类型的车辆最大速度相异时, 同样存在着一个临界占用率 C_c . 当占用率 C 低于临界占用率 C_c 时, 平均能耗几乎不受车道占用率的影响, 保持恒定; 当 C 高于临界占用率 C_c 时, 平均能耗 E_d 随车道占用率 C 的增加而减小, 但是当慢车的最大速度与快车的最大速度相接近时, 会出现平均能耗 E_d 先随车道占用率 C 的增加而增加, 当平均能耗 E_d 达到峰值之后随占用率 C 的增加而减小. 慢车的最大速度值越大, 临界占用率 C_c 越小, 平均能耗 E_d 的峰值越大.

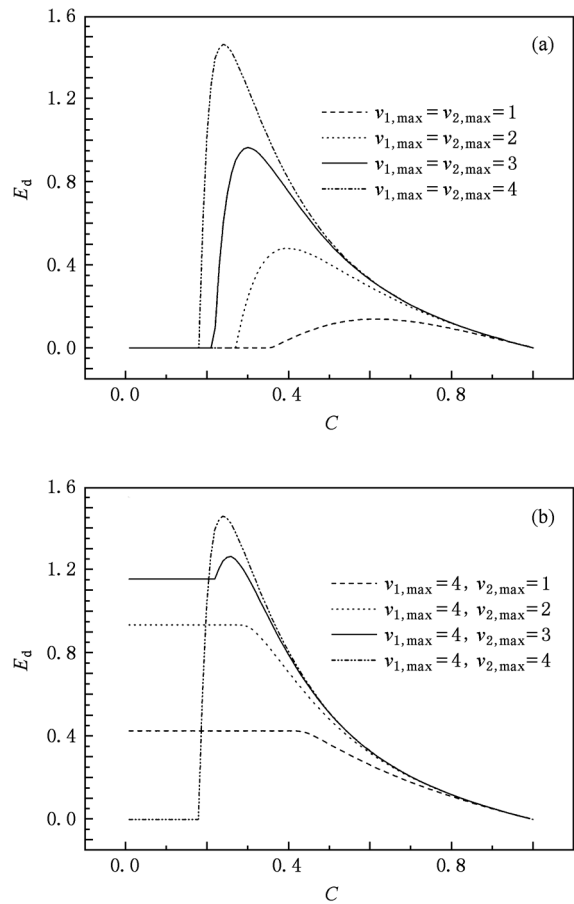


图 1 平均能耗 E_d 随占用率 C 的变化 $w_1 = w_2 = 0.8, R = 0.2, k_2 = 2k_1 = 2$. (a) 两种类型车辆的最大速度值相同, (b) 两种类型车辆的最大速度值不同

为了形象地描述车道上的车流演化过程,我们模拟了车辆运行过程中位置与运行时间的关系,模拟时相关参数取值如下:空间位置为 2000—2500,时间步长为 50000—50400, $w_1 = w_2 = 0.8$, $R = 0.2$, $C = 0.16$, $k_2 = 2k_1 = 2$. 模拟结果如图 2 所示,图中黑点表示车辆.

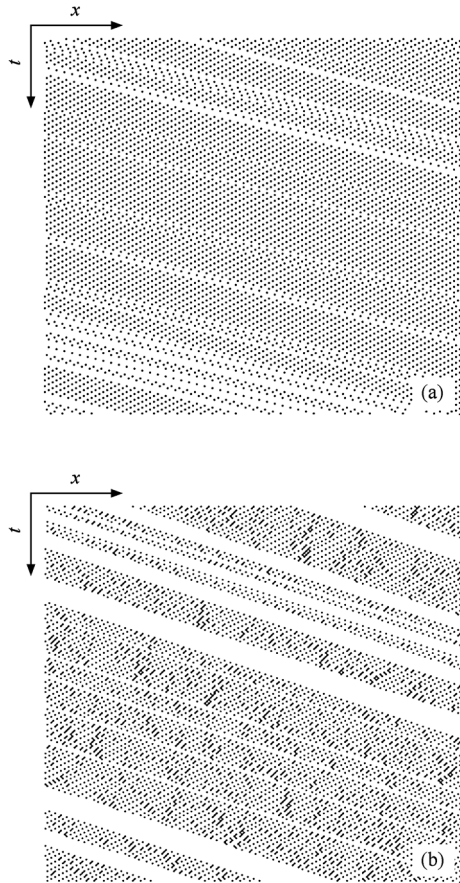


图 2 车辆位置 x 与运行时间 t 的关系 (a) $v_{1,max} = v_{2,max} = 4$, (b) $v_{1,max} = 4, v_{2,max} = 3$

图 2 清晰地显示出车辆位置与运行时间的关系. 对于图 2(a), 车辆对车道的占用率 $C = 0.16$, 低于系统的临界占用率 $C_c = 0.18$, 车流处于畅行相, 所有的车辆都以期望的最大速度行驶, 甚至某些相邻车辆间形成了稳定且狭窄的空白区域. 此时所有的车辆都不存在减速行为, 因此整个交通系统不存在能量的耗散. 对于图 2(b), 车辆对车道的占用率 $C = 0.16$, 低于系统的临界占用率 $C_c = 0.22$, 所有的车辆都期望能以最大速度行驶, 但是受到单车道条件的制约, 快车不能以期望的最大速度行驶, 排在后一队列前面的快车, 有少许时间能以其期望的最大速度行驶, 但是在遇到前一队列时无法

超越, 快车只能排在前一队列的后面, 逐渐演化为慢车. 此时车道上车流的平均速度低于同参数下最大速度值相同的情形, 因而车辆间形成了稳定而宽阔的空白区域. 由于车道上所有的快车都存在着减速行为, 因此整个交通系统在到达临界占用率之前, 形成了较恒定的能量耗散.

3.2. 车辆的混合比例对能耗的影响

图 3 反映了平均能耗 E_d 随两种不同类型车辆混合比例 R 的变化. 从图 3 可以看出: 存在着一个临界占用率 C_c , 当车辆对车道的占用率 C 低于临界占用率时没有能量耗散; 当 C 高于临界占用率时, 平均能耗 E_d 先随车辆对车道的占用率 C 的增加而增大, 达到峰值后平均能耗 E_d 随占用率 C 的增加而减小. 混合比例 R 越大, 临界占用率 C_c 越大, 平均能耗的峰值也越大; 当车辆对车道的占用率 C 相同时, 对应的平均能耗随长车混合比例 R 的增大而增大 (当 $C < C_c$ 情况除外); 当道路上全部为短车时平均能耗的峰值最小, 当道路上全部为长车时平均能耗的峰值最大.

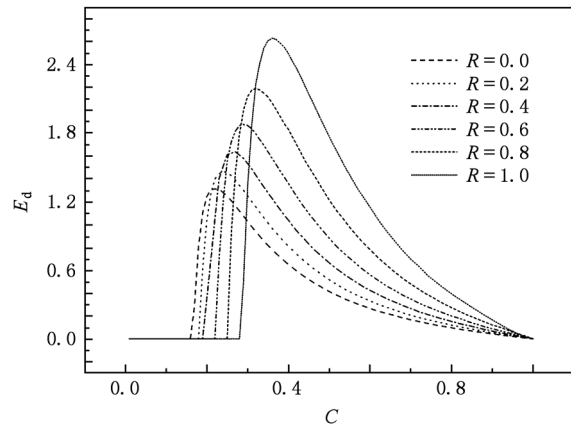


图 3 平均能耗 E_d 随混合比例 R 的变化 $v_{1,max} = v_{2,max} = 4$, $w_1 = w_2 = 0.8, k_2 = 2k_1 = 2$

3.3. 车辆的速度期望因子对能耗的影响

图 4 反映了平均能耗 E_d 随两种不同类型车辆的速度期望因子的变化. 从图 4(a) 可以看出: 存在着一个临界占用率 C_c , 当车辆对车道的占用率 C 低于临界占用率 C_c 时没有能量耗散; 当 C 高于临界占用率 C_c 时, 平均能耗 E_d 先随占用率 C 的增加而增大, 达到峰值后平均能耗 E_d 随占用率 C 的增加而减小. 从图 4(a) 还可以看出: 当两种类型车辆

的速度期望因子相同时,速度期望因子越大,相应的临界占用率 C_c 越大,平均能耗的峰值也越大,但是当速度期望因子同时取 1 时,平均能耗的峰值略有下降. 当速度期望因子同时取 0.6 时,临界占用率 $C_c = 0.14$,但是在 $C = 0.18$ 处出现了一个平均能耗的极小值.

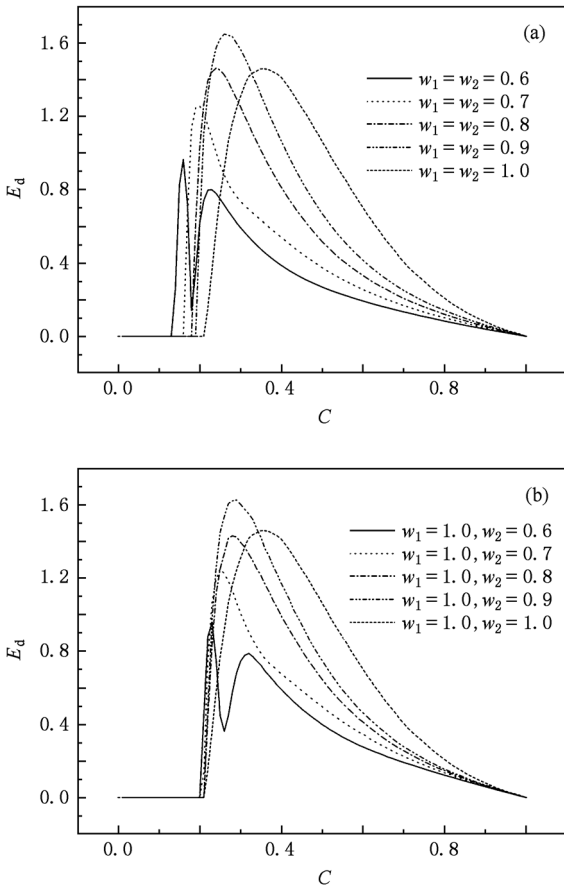


图 4 平均能耗 E_d 随期望因子的变化 $v_{1,max} = v_{2,max} = 4, R = 0.2, k_2 = 2k_1 = 2$. (a) 两种类型车辆的速度期望因子相同, (b) 两种类型车辆的速度期望因子不同

从图 4(b) 可以看出: 同样存在着一个临界占用率 C_c , 当车辆对车道的占用率 C 低于临界占用率 C_c 时没有能量耗散; 当 C 高于临界占用率 C_c 时, 平均能耗 E_d 先随占用率 C 的增加而增大, 达到峰值后平均能耗 E_d 随车道占用率 C 的增加而减小. 从图 4(b) 还可以看出: 当两种类型车辆的速度期望因子不同时, 长车的速度期望因子对临界占用率 C_c 的影响不明显, 随着长车的速度期望因子的增加, 平均能耗的峰值也相应增加, 但是当速度期望因子同时取 1 时, 平均能耗的峰值略有下降. 当短车的速度期望因子取 1.0, 长车的速度期望因子取 0.6 时, 临界

占用率 $C_c = 0.21$, 但是在 $C = 0.26$ 处出现了一个平均能耗的极小值.

3.4. 车辆的质量对能耗的影响

图 5 反映了两种不同类型车辆最大速度值、速度期望因子相同时, 车辆的质量对能耗的影响. 车辆的质量产生了两方面的效应, 一是随着长车质量的增加, 能耗峰值逐渐增加; 二是临界占用率保持不变, 不随车辆质量的改变而改变. 进一步观察发现, 能耗峰值的增加并不显著. 这是因为所设置的车辆混合比例系数 $R = 0.2$, 即相当于平均 9 辆车中才出现 1 辆长车, 因为长车的比例偏低, 所以对系统能耗的影响不明显.

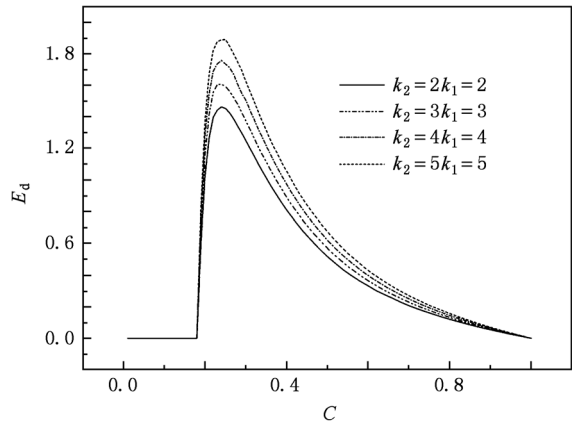


图 5 平均能耗 E_d 随车辆质量的变化 $v_{1,max} = v_{2,max} = 4, R = 0.2, w_1 = w_2 = 0.8$

3.5. 多临界点现象的说明与讨论

图 6 清晰地显示出在能耗曲线中会存在着多临界点现象. 从图 6(a) 可以发现: 当不同类型车辆的速度期望因子相同且较低时, 能耗峰值出现之后会出现一个能耗的极小值; 当车辆的速度期望因子相同且更低时, 能耗峰值出现之后会出现两个能耗的极小值. 进一步研究发现, 极小值点只能出现在速度期望因子 $w_1 = w_2 = 1.0$ 情形下的临界占用率之前.

从图 6(b) 可以看出: 当长车的速度期望因子较小时, 能耗峰值出现之后会出现一个能耗的极小值; 当长车的速度期望因子更低时, 能耗峰值出现之后会出现两个能耗的极小值. 进一步研究发现, 极小值点只能出现在速度期望因子 $w_1 = w_2 = 1.0$ 情形下的能耗峰值对应的临界占用率之前.

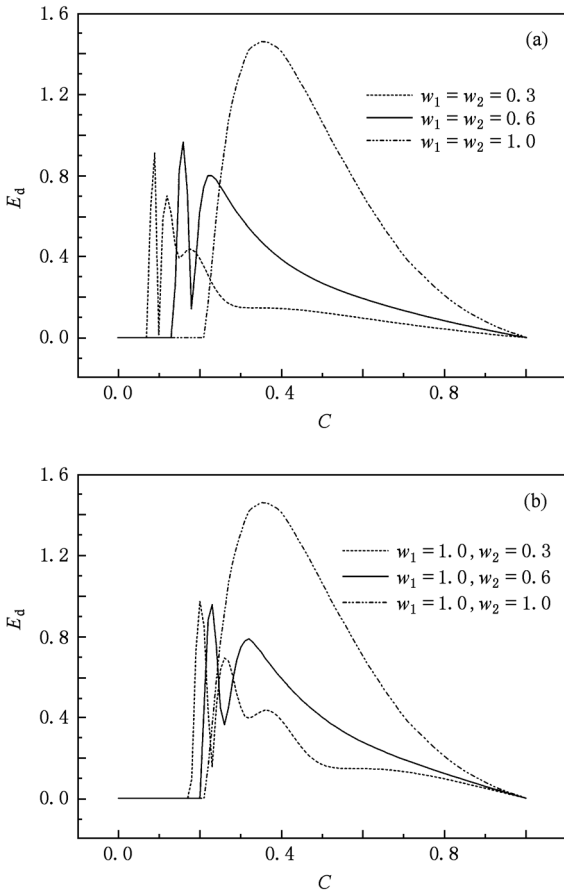


图6 能耗曲线中的多临界点现象 $v_{1,max} = v_{2,max} = 4, R = 0.2, k_2 = 2k_1 = 2$. (a) 两种类型车辆的速度期望因子相同, (b) 两种类型车辆的速度期望因子不同

4. 理论解析

借助平均场理论,通过对车道上车辆间距系综平均,获得了临界占用率的数学表达式. 在较低的占用率 C 下所有的车辆都期望以最大速度行驶,但是受单车道条件的约束快车不能全速前进,而是保持与慢车相同的最大速度行驶. 系统达到临界占用率 C_c 时,对于两种不同类型的车辆而言,有如下关系:

$$w_1 \bar{d}_1 = w_2 \bar{d}_2 = v_{2,max}. \quad (3)$$

此时车道上的空置格点数

$$N_1 \bar{d}_1 + N_2 \bar{d}_2 = L(1 - C), \quad (4)$$

道路上长车数

$$N_2 = RCL/2, \quad (5)$$

道路上短车数

$$N_1 = (1 - R)CL. \quad (6)$$

由(3)—(6)式解得

$$C = \frac{2w_1w_2}{2w_2v_{2,max} + Rw_1v_{2,max} + 2w_1w_2 - 2Rw_2v_{2,max}}. \quad (7)$$

(7)式的理论解析结果除了与图1(a)中 $v_{1,max} = v_{2,max} = 1, v_{1,max} = v_{2,max} = 2$ 参数下的模拟结果差别较大外,与图3—图6的模拟结果都比较符合. 对于图1(a)中的 $v_{1,max} = v_{2,max} = 1, v_{1,max} = v_{2,max} = 2$ 情形,车道上的车辆最大速度偏低属于低速同步,车辆耦合程度加剧,临界占用率提前出现.

系统的能耗主要来自两方面,一是来自车辆间相互作用造成的能耗,当目标车辆与前方车辆的间距低于当前车速时,目标车辆确定性减速,导致能量耗散;二是源于自动巡航控制系统的速度负补偿规则,导致能量耗散.

对于图1(a)而言,在较低的车流密度下,车辆的最大速度值相同时,所有的车辆都能以期望的最大速度行驶,车道上车辆不发生相互作用,无能量耗散. 对于图1(b)而言,车辆的最大速度不同时,快车不能全速前进,保持与慢车相同的最大速度向前行驶,速度负补偿机制产生作用,导致能量耗散,且低密度下的能量耗散比较显著.

对比图3中两种单一类型车辆的情形可以发现,单一长车情形下平均能耗峰值是单一短车情形下平均能耗峰值的两倍. 但是,此结果并不能作为推广短车的理由,因为从车载人数的角度看,长车的一次承载能力是短车的几倍或十几倍,因此从人均能耗方面考虑,长车才是今后交通发展的主流.

对于图4中出现的多临界点现象,可解释为当长车的速度期望因子 $w_2 = 0.6$ 时,车道上的车辆会出现两次速度同步. 第一次为车辆最大速度的同步,低于此临界占用率 C_1 ,车道上车辆不发生相互作用,无能量耗散,超过此临界占用率 C_1 ,车道上车辆开始发生相互作用而造成能量耗散. 第二次为车辆次级最大速度(低于最大速度值一个单位)的同步,此时车道上车辆速度同步,不存在车辆的相互作用,但存在速度负补偿,在此临界占用率 C_2 下系统能耗出现极小值. 对于图4(a),将相关参数代入(7)式计算得到 $C_1 = 0.14, C_2 = 0.18$. 对于图4(b),将相关参数代入(7)式计算得到 $C_1 = 0.21, C_2 = 0.26$. 由此可知,理论解析与数值模拟结果符合.

观察图5可以发现,临界占用率不随车辆质量

的改变而改变. 另一方面, 理论解析公式(7)中不显含质量项, 即临界占用率与质量无关. 由此可知, 理论解析与数值模拟结果相一致.

对于图6中出现的多临界点现象, 可解释为当长车的速度期望因子 $w_2 = 0.3$ 时, 车道上的车辆会出现三次速度同步. 第一次为车辆最大速度的同步, 低于此临界占用率 C_1 , 车道上车辆不发生相互作用, 无能量耗散, 超过此临界占用率 C_1 , 车道上车辆开始发生相互作用而造成能量耗散. 第二次为车辆次一级最大速度(低于最大速度值一个单位)的同步, 此时车道上车辆速度同步, 不存在车辆的相互作用, 但存在速度负补偿, 在此临界占用率 C_2 下系统能量耗散出现极小值. 第三次为车辆次二级最大速度(低于最大速度值两个单位)的同步, 此时车道上车辆属于低速同步, 既存在车辆的相互作用, 又存在速度负补偿, 但车辆间的相互作用较弱, 在此临界占用率 C_3 下系统能量耗散再次出现极小值.

代入相关参数计算发现, 解析解与数值模拟结果相符合.

5. 结 论

本文在自动巡航控制的元胞自动机混合交通流模型的基础上, 研究了不同类型车辆的最大速度、混合比例、速度期望因子以及质量对系统能耗的影响. 在自动巡航的混合交通系统中, 能耗峰值点之前, 能耗与车辆对车道占用率之间的关系相对比较复杂, 但是能耗峰值点过后, 当占用率相同时, 长车的最大速度值及混合比例越大, 能耗越大; 车辆的速度期望因子越高, 能耗越大; 车辆的质量越大, 能耗越大. 随着重车比例的增加, 能耗也逐渐增加. 不同路况气象条件下, 通过对相关参数的适当调节, 可以实现流量与能耗的最优结合. 本文的仿真结果可为交通管理与控制提供理论和技术支持.

- [1] Helbing D 1997 *Phys. Rev. E* **55** 3735
- [2] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* **I 2** 2221
- [3] He H D, Lu W Z, Xue Y, Dong L Y 2009 *Chin. Phys.* **18** 2703
- [4] Li X G, Gao Z Y, Zhao X M, Jia B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4777 (in Chinese) [李新刚、高自友、赵小梅、贾 斌 2008 物理学报 **57** 4777]
- [5] Kuang H, Liu M R, Kong L J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894 (in Chinese) [邝 华、刘慕仁、孔令江 2004 物理学报 **53** 2894]
- [6] Jia B, Li X G, Jiang R, Gao Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6845 (in Chinese) [贾 斌、李新刚、姜 锐、高自友 2009 物理学报 **58** 6845]
- [7] Peng G H, Sun D H 2009 *Chin. Phys.* **18** 5420
- [8] Ding J X, Huang H J, Tang T Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7591 (in Chinese) [丁建勋、黄海军、唐铁桥 2009 物理学报 **58** 7591]
- [9] Li K P, Guan L J 2009 *Chin. Phys.* **18** 2200
- [10] Qian Y S, Wang H L, Wang C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2115 (in Chinese) [钱勇生、汪海龙、王春雷 2008 物理学报 **57** 2115]
- [11] Jiang R, Jin W L, Wu Q S 2008 *Chin. Phys.* **17** 829
- [12] Zheng R S, Tan H L, Kong L J, Liu M R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4641 (in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2005 物理学报 **54** 4641]
- [13] Li Q D, Dong L Y, Dai S Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7584 (in Chinese) [李庆定、董力耘、戴世强 2009 物理学报 **58** 7584]
- [14] Chen S D, Zhu L H, Zheng R S, Kong L J, Liu M R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2271 (in Chinese) [陈时东、朱留华、郑容森、孔令江、刘慕仁 2009 物理学报 **58** 2271]
- [15] Zhang W, Zhang W, Yang X Q 2008 *Physica A* **387** 4657
- [16] 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]

Energy dissipation of the mixed traffic system with automatic cruise^{*}

Zhu Liu-Hua[†] Zheng Rong-Sen Tian Huan-Huan Wei Yan-Fang

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

(Received 24 June 2010; revised manuscript received 12 August 2011)

Abstract

Based on the cellular automaton traffic flow model of automatic cruise controlling, the influences of speed maximum, mixing ratio, expectation factor of speed, and mass of vehicle on energy dissipations of the mixed traffic system are studied. Through computer simulation, the energy dissipations of mixed traffic system under the different parameters are obtained and analysed by the mean field theory. The theoretical analyses are consistent with the results of numerical simulation.

Keywords: cellular automaton, automatic cruise control, mixed traffic, energy dissipation

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 05.50.+q

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10762005, 11047003), the Scientific Research Program of the Education Bureau of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China (Grant Nos. 200807LX401, 200607LX079), and the Scientific Research Foundation for Young Scholars of Yulin Normal College, China (Grant No. 2009YJQN25).

[†] E-mail: zhulihua421@sina.com