

考虑意外事件对交通流影响的元胞自动机交通流模型*

钱勇生[†] 曾俊伟 杜加伟 刘宇斐 王敏 魏军

(兰州交通大学交通运输学院, 兰州 730070)

(2010年7月24日收到; 2010年8月10日收到修改稿)

在 NaSh 模型的基础上, 考虑交通事故和养护路段等意外事件对高速公路交通流的影响, 建立了有意外事件影响的在车道管制下的高速公路交通流元胞自动机模型, 并进行数值模拟. 研究发现: 意外事件对高速公路交通流有明显影响, 并且意外事件对交通流的影响在某一密度值范围内尤其明显, 且意外事件堵塞点在第一车道比在第二车道对交通流的影响小; 同时, 在该密度值范围内, 意外事件堵塞时间和堵塞路段长度越长, 对交通流的影响就越大.

关键词: 元胞自动机, 交通流, 意外事件

PACS: 05.10.Gg

1. 引言

高速公路是一个国家现代化和交通运输现代化的重要标志之一, 是国家的重要资源和国力的象征. 随着高速公路的广泛投入使用, 随之而来的道路老化和交通事故问题不容忽视. 研究表明^[1], 大部分高速公路交通堵塞的诱导因素有车辆故障、货物倾落、交通事故、暂时维护与修理、施工活动、信号和检测器等高速公路机电系统故障及其他的特殊但非正常的事件, 这些使交通流出现堵塞的事件统称为意外事件, 意外事件主要包括交通事故和路段的维修养护. 由于意外事件的影响, 车辆的行为会发生变化, 因此会导致交通流状态的改变, 表现为交通流参数随着时间的变动. 由交通调查可知, 高速公路上发生的意外事件会干扰正常的交通流, 从而导致交通延滞, 严重时甚至引发交通堵塞^[2]. 如何在维修养护时保证行车安全, 维持行车秩序也得到了许多交通工作者的研究^[3].

元胞自动机模型作为模拟非线性复杂系统的一种有效工具, 近年来在交通流的研究中得到了广泛的应用, 模型的时间、空间、状态均离散, 规则简单, 非常适合计算机模拟^[4,5]. 元胞自动机模型在保留交通流这一复杂系统的非线性行为和其他物理特征的同时, 更易于计算机操作, 可以通过灵活修

改其规则以考虑各种实际交通状况. 结合国内外专家学者的研究^[6-27], 本文从微观角度探讨当道路上发生意外事件时, 车辆密度与车流流量, 车辆平均速度的关系. 在 NaSh 模型的基础上, 考虑意外事件条件, 建立了新的交通流元胞自动机模型, 仿真不同情形下意外事件条件下的车流状态. 该研究为高速公路交通流提供了新的理论依据, 为提高高速公路通行能力具有现实的指导意义.

2. 模型的建立

以双向六车道的高速公路为研究对象, 最外侧车道为紧急停车道, 亦称救援车车道; 最内侧车道是超车道; 中间车道是正常行驶车道. 文中主要研究超车道和行车道的车流状态, 以下分别称为第 1 车道和第 2 车道. 两车道高速公路表示为并列的长度为 L 的元胞链, 每个元胞的长度定为 $200/36$ m, 约为 5.5 m.

本文将在高速公路上行驶的车辆归纳为小汽车(包括小汽车和小型客车等)和货车(大客车和货车等), 这两种速度类型的车按密度和混合比例随机分布于两车道上, 假定每辆小汽车占 1 个元胞, 在高速公路上的车速范围是 0 到 120 km/h, 对应于 0 到 6 个元胞/秒; 每辆货车占 3 个元胞, 在高速公路

* 国家社会科学基金(批准号: 09XJY029)资助的课题.

[†]E-mail: qianyongsheng@mail.lzjtu.cn

上的车速范围是 0 到 100 km/h, 对应于 0 到 5 个元胞/秒. 两车之间的最小安全距离与后方车辆成正比关系, 即后方车辆的速度越大与前方车辆间的安全距离就应当越大, 本文假定最小安全距离在数值上与后方车辆的速度相等. $X_i(t)$ 表示第 i 辆车在 t 时刻的位置, $V_i(t)$ 表示第 i 辆车在 t 时刻的速度, V_{hmax} 和 V_{imax} 分别表示小汽车和货车的最大速度. P_a 为车辆的加速概率, P_d 为车辆的减速概率, P_l 为车辆的换道概率. 第 i 辆车 t 时刻与前方紧邻车辆的间距 $Gp_i(t)$ 为:

$$Gp_i(t) = \begin{cases} X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1 & (\text{第 } i \text{ 辆车的前方车辆为小汽车}), \\ X_{i+1}(t) - X_i(t) - 3 & (\text{第 } i \text{ 辆车的前方车辆为货车}). \end{cases}$$

对第 1, 2 两个车道上行驶的车辆主要有两种管制方法, 车道管制和速度管制.

2.1. 车道管制下 CA 模型的建立

车道管制是应用比较普遍的一种管制方法. 管制规则: 第一车道即最内侧车道为超车道, 第二车道即中间车道为行车道. 车辆一般在第二车道行驶, 只有需要超车时才转入第一车道. 转入第一车道的车辆不能长时间占用该车道, 当转回第二车道的条件成立时即刻转回第二车道行驶.

车道管制下车辆的演化规则如下.

第 i 辆车 $t+1$ 时刻的速度规则:

1) 加速. 当满足 $Gp_i(t) \geq 2 \times \min(V_i(t) + 1, V_{max})$ 时, 车辆加速, 加速度是 1, 即 $V_i(t+1) = \min(V_i(t) + 1, V_{max})$;

2) 减速. 当满足 $Gp_i(t) < 2 \times V_i(t)$ 时, 车辆只能考虑换道或减速即 $V_i(t+1)$ 为 $[Gp_i(t)/2]$ 或 $[Gp_i(t)/2] + 1$;

3) 恒速. 当满足 $2 \times V_i(t) \leq Gp_i(t) < 2 \times (V_i(t) + 1)$, 车辆保持原来的速度, 即 $V_i(t+1) = V_i(t)$;

4) 随机减速. 当 $V_i(t) > 0$ 且 $Gp_i(t) \geq 2 \times V_i(t)$ 时, 车辆以概率 P_d 减速, $V_i(t+1) = V_i(t) - 1$.

车辆位置更新规则:

没有换道的车辆有 $X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t)$;
换道的车辆有 $X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t)$.

2.2. 车辆换道条件

在车道管制下, 车道之间的转换条件是不同

的, 下面分别叙述. $Gp_i^f(t)$ 表示该车距临道前方最近车辆的距离, $Gp_i^b(t)$ 表示该车距临道后方最近车辆的距离.

1) 第一车道车辆如果满足 $Gp_i^f(t) \geq 2 \times (V_j(t) - 1)$ 且 $Gp_i^b(t) > 2 \times (V_j(t) + 1)$, 车辆由第一车道转入第二车道. 换道后的车辆的速度为 $V_i(t+1) = \max(V_i(t) - 1, 0)$.

2) 第二车道车辆如果满足 $Gp_i(t) < 2 \times V_i(t)$ 且 $Gp_i^f(t) \geq 2 \times (V_j(t) + 1)$ 且 $Gp_i^b(t) > 2 \times (V_j(t) + 1)$, 车辆就可以以概率 P_l 由第二车道转入第一车道. 换道后的车辆的速度为 $V_i(t+1) = \min(V_i(t) + 1, V_{imax})$, V_{imax} 表示第 i 辆车的最大速度.

2.3. 引入意外事件

当道路上发生事故或道路养护维修时, 事故车辆或维修路段所在位置不能有车辆占有或通过. 本文只研究当两车道中的某一车道被堵塞时的情况, 交通流是二入一, 行驶至该路段的车辆要转入畅通的车道才能通过. 此时道路依然采用高速公路中常采用的车道管制.

2.3.1. 事故堵塞点

某一个车辆满足以下条件时就会发生事故:

1) $t = T_c$, T_c 为预先设定的事故发生的时间步, 当模拟到 T_c 时, 车道上必然会出现事故车辆;

2) 事故车辆位置为 T_c 时步时预设点后方最近车辆;

3) $T_l = 1$, T_l 表示事故次数, 本文中只讨论发生一次事故, 所以初始化时 $T_l = 1$; 当事故发生后将 T_l 赋值为 0.

以上 3 个条件决定了只在特定时步和特定位置发生交通事故, 而且保证只有一辆事故车辆. 当一辆车全部满足以上 3 个条件时, 车辆就会停止在所在位置构成一个堵塞点, 其他车辆要想通过该位置只能够绕行另一车道.

当满足条件: $t - T_c = T_s$, 其中 T_s 为事故的发生到通车的时间长度, 事故车辆即刻被移除. 通过这个条件可以控制事故车辆堵塞时间.

2.3.2. 养护路段

在单车道养护时换道规则与在事故车辆附近的换道行驶规则基本相同. 在养护路段末端附近, 车辆换道规则中不考虑后方空格数.

当两车道全部养护时, 需要使用中间隔离带的开口绕行, 在此将养护路段两端开口长度设为 3 个

元胞,并对接近养护路段前端的车辆作如下的调整. X_w^s 表示养护路段前端位置.

1) 第一车道车辆 i

如果满足 $X_w^s - 20 \leq X_i < X_w^s - 3$ 时,车辆不再转入第二车道,而是排队等待转入对向第一车道;如果满足 $X_w^s - 3 \leq X_i < X_w^s$ 时,车辆只检测转入对向第一车道的换道条件. 如果满足,则转入对向第一车道,否则留在原车道等待.

2) 第二车道车辆 i

如果满足 $X_w^s - 20 \leq X_i < X_w^s$ 时,车辆就会首先检测转入第一车道的换道条件是否满足,如果满足即转入第一车道按 1) 中规则行驶,否则留在原道正常行驶.

3. 数值试验模拟结果和讨论

为便于后面讨论,定义车辆的空间占有率 $\rho = (N_{car} + 3 \times N_{truck}) / (2 \times L)$, N_{car} 和 N_{truck} 分别是车道小汽车和货车的数, L 是道路的总长度. 车流流量 Q 是单位时间内经过某一定点的车辆数 $Q = \frac{N_T}{T}$, N_T 为 T 时间内通过观测点的车数. 平均速度 $V_a = \frac{1}{N \times T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N v_i^t$, v_i^t 是 t 时刻第 i 车的速度. 从事故的发生到通车的时间为 T_s . 发生意外事件时造成路段不能行驶的路段比例 $R_s = \frac{L_s}{L}$, L_s 为事故时或道路养护维修时连续封闭的路段长度.

以下数据是每个样本运行 20000 时步,取最后 3600 时步(对应于现实中的一个小时,为便于控制意外事件造成的车道堵塞的时间)的值作时间平均,为了消除随机性影响,取 20 个样本作平均.

3.1. 交通事故对交通流的影响

3.1.1. 不同事故时间对交通流的影响

当某一车道上发生交通事故时,如果不能得到及时的处理,就会造成交通堵塞甚至引发二次交通事故. 下面分别讨论事故发生在不同车道(第一车道或第二车道)和事故造成的堵塞时间长短对交通流的影响. 为不失一般性,本文只讨论交通事故发生在第一车道或第二车道, T_s 分别为 0 h(无事故)、0.5 h 和 1 h 时交通流状态.

图 1 是第一车道发生事故,且 T_s 分别为 0 h, 0.5 h 和 1 h 时的空间占有率与流量关系图和空间占

有率与平均速度关系图. 从图 1(a) 可以看出,当 $\rho < 0.05$,不同的 T_s 对应的流量之间无区别,说明在低密度下第一车道上发生交通事故时堵塞时间对车流的影响不大,车辆能够顺畅行驶. 当 $0.05 < \rho < 0.60$ 时,第一车道中的交通事故就会对车流产生较大影响,随着空间占有率的增大, T_s 为 0.5 h 和 1 h 对应的流量明显比无事故时低, T_s 为 0.5 h 时的流量增加趋势介于无事故和 T_s 为 1 h 对应的流量之间. 说明在该阶段第一车道的交通事故已经对车流产生较大影响. 而 T_s 为 0.5 h 时,前 0.5 h 是有事故车堵塞的,形成堵塞带将流量维持在一个很低的水平,后 0.5 h 事故车被处理后堵塞带逐渐消散,从而此时车流量上升到无事故的水平. 而这一个小时总体的流量和平均速度是由前半小时的堵塞相和后半小时的畅通相组成,从而形成 T_s 为 0.5 h 时流量和平均速度变化图. 当 $0.05 < \rho < 0.60$ 时, T_s 为 1 h 时交通流流量维持在 1100 左右,而其他两种情况下的交通流流量随着车辆密度的增加有不同程度的下降. 当 $\rho > 0.60$ 时,3 种情况的流量变化趋于一致,此时道路上的交通流密度较大,车辆之间相互影响明显,交通流的黏滞系数较大,从而由于交通事故形成的堵塞对交通流的影响没有突显,所以无事故、有事故以及不同的事故时间时对应的交通流量差距不大.

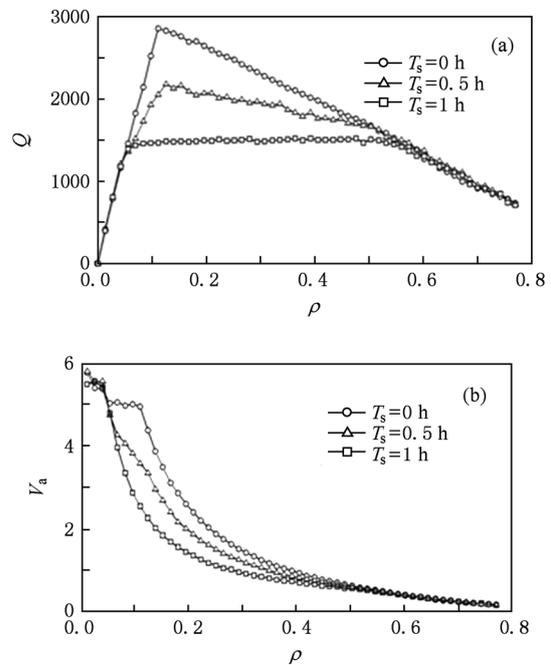


图 1 第一车道发生事故时(a) ρ - Q 和(b) ρ - V_a 关系图

从图 1(b) 可以看出,当 $\rho < 0.05$ 时,不同的 T_s

对应的平均速度之间没有太大差别,说明在低密度时在第一车道上发生交通事故时堵塞时间对车辆的平均速度影响不大,车辆通行顺畅. 当 $0.05 < \rho < 0.60$ 时,3 种情况下的平均速度随着车辆密度的增加下降幅度逐渐减小,但总体呈下降趋势. 从 $T_s = 0$ 的平均速度下降的情况说明即使在没有交通事故时,车辆的平均速度也会随着车辆密度的增加而减小;而 $T_s = 0.5$ h 和 $T_s = 1$ h 的平均速度降低幅度依次增大说明随着堵塞时间的增长,堵塞对车辆行驶速度的影响在逐渐增强. 对应相同的密度,其中 $T_s = 0$ h 时平均速度最大, $T_s = 1$ h 时的平均速度最小, $T_s = 0.5$ 时的平均速度介于两者之间. 当 $\rho > 0.60$ 时,车辆密度逐渐增大,第一车道上车辆数量增多,车辆之间的相互影响增强,由于交通事故造成的堵塞对车辆行驶的速度影响已经不是很明显. 所以,随着车辆密度的增加,有无症状以及事故堵塞时间的长短对车辆平均速度的影响逐渐趋于一致.

在车道管制下,第二车道是行车道,车辆绝对数大. 在该车道上发生交通事故势必会造成很大的

影响. 图 2 是第二车道发生事故,且 T_s 分别为 0,0.5 和 1 h 时的空间占有率-流量和空间占有率-平均速度图. 当 $\rho < 0.05$ 时,随着车辆空间占有率的增大交通流流量增大,增大的幅度稍微有点不同,随着 T_s 的增大而减小;同时,平均速度随着车辆空间占有率的增大在小范围内波动,随着事故时间 T_s 的增大的平均速度减小. 说明在低密度下,无事故时车辆正常行驶不会拥挤也没有堵塞带,而当第二车道的车辆发生事故时,所形成的堵塞点对交通流的影响凸显. 当 $0.05 < \rho < 0.6$ 时,与第一车道类似,随着车辆空间占有率的增大,事故时间 T_s 为 0.5 h 对应的流量介于 T_s 为 0 和 1 h 对应的交通流流量之间. 当 $0.12 < \rho < 0.6$ 时,无事故和 T_s 为 0.5 h 时对应的交通流流量随着车辆空间占有率的增大而减小;而 T_s 为 1 h 交通流量变化不大,交通流流量稳定在 750;当 $\rho > 0.60$ 时,类似于第一车道发生事故,三种情况对应的流量变化趋于一致. 同时,当 $\rho > 0.05$ 时,在第二车道上的车辆的平均速度的变化状态跟第一车道类似,在此不再累述.

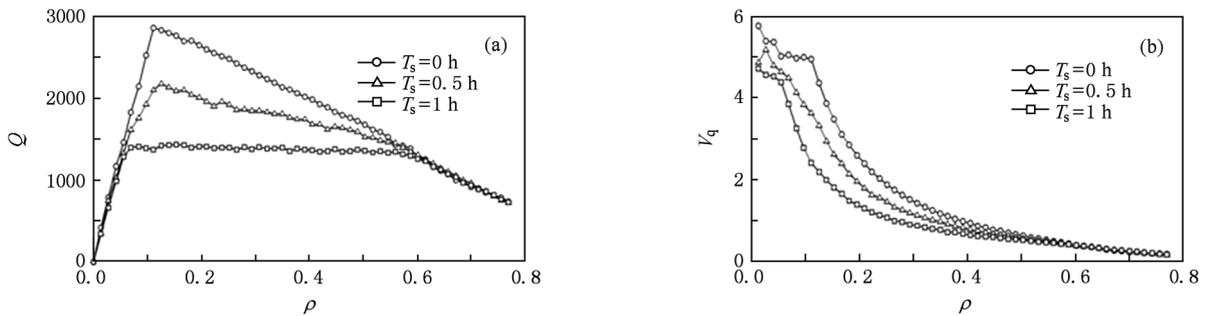


图 2 第二车道发生事故(a) ρ - Q 和(b) ρ - V_a 关系图

通过上面的讨论,发现当车辆空间占有率小于 0.05 或大于 0.6 时交通事故堵塞时间长短对交通流的影响不明显. 但是当车辆空间占有率在 0.05 到 0.60 时交通事故造成的堵塞时间的长短对交通流的影响比较明显. 车道上的所有车辆行驶平均速度作为交通流流量的外在表现,其随 ρ 的变化规律跟流量的变化规律一致.

3.1.2. 事故发生在不同车道对交通流的影响

高速公路上的交通事故发生在第一车道和第二车道上对交通流的影响也是不完全相同的. 图 3 和图 4 分别是 $T_s = 0.5$ h 和 1 h 时,第一车道和第二车道发生事故及无事故的空间占有率-流量、空间占有率-平均速度关系图. 由这两个图可以看出两车道发生交通事故时交通流流量和平均速度的变化趋势大

体一致,只有略微区别.

由图 3 (a) 可以看出,当 $\rho < 0.05$ 时,第一车道发生事故和无事故的流量变化是一致的,说明在低密度下第一车道车辆很少,事故对交通流产生影响很小;由于第二车道是行车道,一旦发生事故,就迫使事故点后面的车辆减速换道进而影响它们的速度和总体的交通流量. 当 $0.05 < \rho < 0.12$ 时,有事故时的交通流流量的增长趋势明显比无事故时交通流流量的增长趋势缓和,第一车道事故和第二车道事故流量增长趋势之间的区别变小. 当 $\rho > 0.05$ 时,无论是在第一车道还是第二车道事故开始影响后面的车辆行驶,进而影响整个路段交通流. 当 $0.12 < \rho < 0.60$ 时,交通流流量随着车辆空间占有率的增大而减小,第二车道事故对应的交通流流量略小

于第一车道事故对应的交通流量. 当 $\rho > 0.60$ 时, 无事故、第一车道事故和第二车道事故对应的交通流量变化趋于一致, 说明高密度时交通事故无论有无发生以及发生在哪一车道对交通流的影响也不明显.

对应于图 3(b) 中, 当 $\rho < 0.05$ 时, 第一车道发生事故与无事故的平均速度的变化趋势基本一致, 而第二车道发生事故时, 平均速度会有一个微小的波动, 这与行车道发生事故后, 后车减速换道的实

际相符. 当 $0.05 < \rho < 0.60$ 以后, 第一车道事故和第二车道事故对应的车辆平均速度变化趋于一致, 并且数值也几乎相等, 说明车辆密度增加时交通事故无论发生在哪一车道对车辆的正常行驶造成影响, 影响程度随密度的增大而减小. 当 $\rho > 0.60$ 时, 无事故、第一车道事故和第二车道事故对应的车辆平均速度变化趋于一致, 说明高密度时交通事故无论有无发生以及发生在哪一车道对车辆行驶的影响不明显.

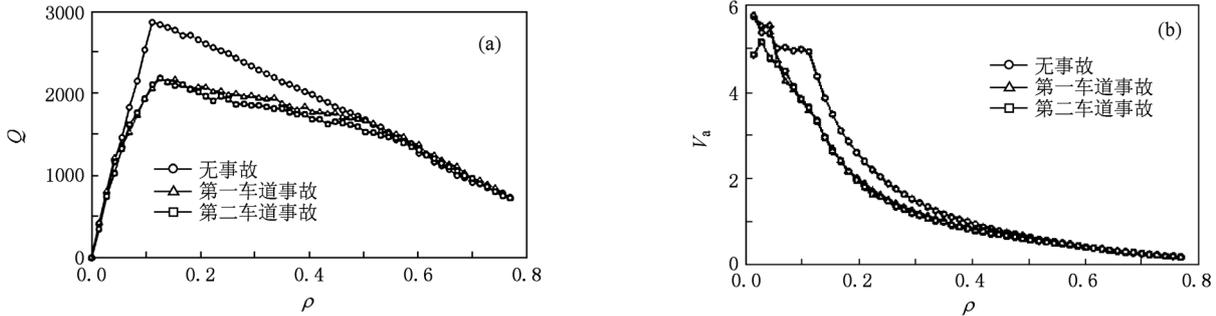


图 3 第一车道事故 $T_s = 0.5$ h 时 (a) ρ - Q 和 (b) ρ - V_a 关系图

图 4 是 $T_s = 1$ h 时车辆空间占有率与流量关系图和车辆空间占有率与平均速度关系图. 从图 4 中可以看出, 当 $0.05 < \rho < 0.60$ 时, 道路上发生交通事故时交通流流量没有大的变化. 第一车道事故和第

二车道事故对应流量分别大约稳定在 1400 和 1300. 其他情况均与在 $T_s = 0.5$ h 时的变化大致类似.

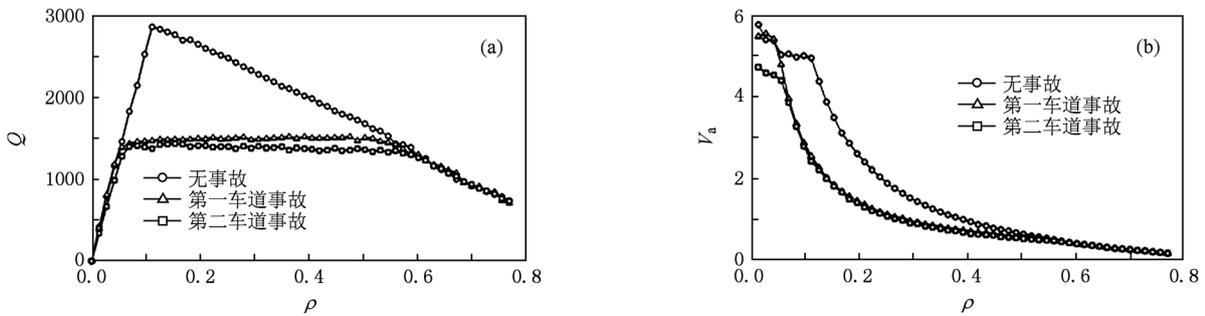


图 4 第二车道事故 $T_s = 1$ h 时 (a) ρ - Q 和 (b) ρ - V_a 关系图

通过上面讨论, 发现在不同的车道上发生交通事故对交通流的影响之间的区别比较有限, 总体来讲交通事故发生在第二车道上比发生在第一车道对交通流的影响略大. 造成该区别的原因是本模拟系统采用车道管制方式, 第二车道是行车道.

3.2. 道路养护对交通流的影响

3.2.1. 单车道养护对交通流的影响

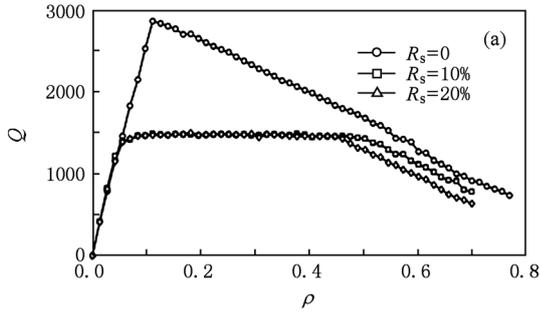
高速公路定期维修养护可以延长道路使用寿命和提高高速公路的通行效率. 为维持高速公路的

正常运营, 在养护施工的同时还应当保证道路的通畅. 一般单车道施工时封闭施工路段, 使得两个车道的车流并入未施工车道, 即二入一. 下面通过数值模拟讨论交通流二入一时, 对整个路段交通流的影响.

本节的模型包含 1000 个元胞, 其中每个元胞对应于实际中 5.5 m, 模拟道路总长为 5500 m; 模拟养护路段的长度分别为 100 和 200 单位个元胞, 即分别对应于实际中的 550 m 和 1100 m, 分别占模拟路段总长度的 10% 和 20%. 进而讨论养护路段对整个

路段交通流的影响.

图 5(a) 和(b) 分别是在第一车道养护路段比



R_s 为 0, 10% 和 20% 的空间占有率与流量、空间占有率与平均速度关系图.

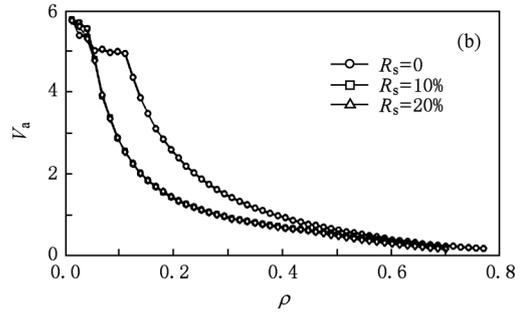


图 5 在第一车道养护时养护路段比 R_s 为 0, 10% 和 20% 时 (a) ρ - Q 和 (b) ρ - V_a 关系图

由图 5(a) 可以看出, 当 $\rho < 0.05$ 时, R_s 为 0, 10% 和 20% 对应的交通流流量之间的差别不大, 表明低密度下有没有养护路段以及养护路段的长短对交通流的影响不大. 由图 5(b) 可以看出在 $\rho < 0.05$ 时, R_s 为 0, 10% 和 20% 对应的平均速度之间的差别也不大, 这是由于第一车道中行驶的车辆比较少, 养护路段的封闭只会影响到少数车辆, 从总体上来看影响很小. 说明在采用车道管制时, 车辆密度较小的情况下, 养护路段在第一车道中对整个路段交通流产生的影响很小.

有率 ρ 的增大不发生大的变化; 而存在养护路段时 R_s 为 10% 和 20% 时对应的平均速度随着车辆空间占有率的增大而迅速减小. 说明在这个阶段, 养护路段在第一车道的存在已经对交通流产生了影响, 迫使整个路段的交通流量不再增加以及平均速度迅速减小.

随着 ρ 的增大, 养护路段对整个路段的交通流产生了很大影响. 由图 5(a) 可见, 在 $0.05 < \rho < 0.12$ 时, 没有养护路段的情况下, 交通流量随着 ρ 的增大而继续增大; 而存在养护路段时, 在 $0.05 < \rho < 0.45$ 阶段, 对应的交通流量随着 ρ 的增大不再继续增大, 而是维持在 1500 左右且 R_s 为 10% 和 20% 对应的交通流量之间没有明显区别. 由图 5(b) 可见, 在 $0.05 < \rho < 0.12$ 这个阶段, 没有养护路段时对应平均速度随着车辆空间占

当 $\rho > 0.45$ 时, 由图 5(a) 可以看到 R_s 为 10% 和 20% 对应的交通流量之间产生了明显的区别, 随着 ρ 的增大, R_s 为 20% 对应的交通流量减小趋势比 R_s 为 10% 时的减小趋势缓和. 同时由图 5(b) 可以看到在这个阶段 R_s 为 10% 时对应的平均速度比 R_s 为 20% 对应的平均速度略大, 比没有养护路段时对应的平均速度略大. 可见在这个阶段, 车流密度较大, 随着 ρ 的增大, 道路中空闲空间的大小直接影响交通流的顺畅程度, 所以 R_s 为 20% 时对交通流的影响大于 R_s 为 10%.

图 6(a) 和(b) 分别是在第二车道养护路段比 R_s 为 0, 10% 和 20% 的空间占有率与流量、空间占有率与平均速度关系图.

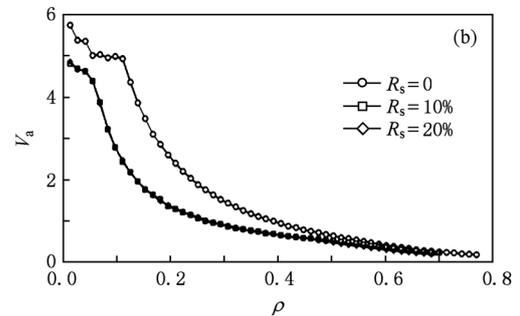
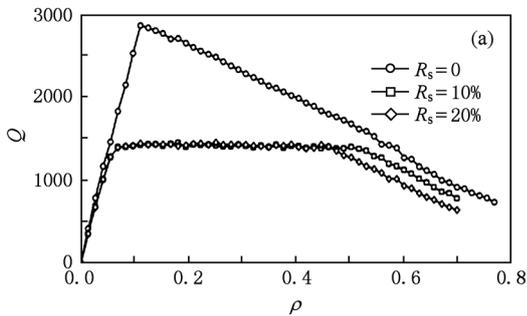


图 6 在第二车道养护时养护路段比 R_s 为 0, 10% 和 20% 时 (a) ρ - Q 和 (b) ρ - V_a 关系图

由图 6(a) 可以看到与第一车道中存在养护路段不同, 第二车道中存在养护路段就会对交通流产生影响. 在 $\rho < 0.05$ 时, 随着车辆空间占有率的增

大, R_s 为 10% 和 20% 对应的交通流流量增大的幅度就比无养护路段时增大的幅度小. 由图 6(b) 可以更加清楚的看到在 $\rho < 0.05$ 时, 存在养护路段时的

车辆的平均速度比没有养护路段时小. 说明当养护路段在第二车道中, 即使是在低密度下也会对交通产生影响. 说明在车道管制下, 第二车道中的车辆较多, 遇到养护路段且需要绕行的车辆数目较大, 所以即使在低密度下, 养护路段会对整个路段的交通流产生影响. 而 R_s 为 10% 和 20% 时对应的流量和平均速度之间没有区别.

当 $0.05 < \rho < 0.45$ 时, 有养护路段时对应的交通流就停止随着 ρ 的增大而增大, 交通流流量维持在 1400 左右. 说明交通流流量在这个车辆空间占有率范围内, 会被由于养护路段产生的瓶颈所限制.

由图 6(a) 可以看到当 $\rho > 0.45$ 时, R_s 为 0, 10% 和 20% 对应的流量有较大的不同, 类似于养护路段在第一车道中. 说明在高密度下空闲车道空间的大小对交通流有很大的影响. 对应于图 6(b), 当 $\rho > 0.45$ 时, 平均速度的变化与第一车道养护时的情形类似.

上面介绍的是不同车道上不同 R_s 对交通流的影响, 发现只要道路上存在养护路段, 无论其长短都能够很明显地降低整个路段的通行效率. 同时在

$\rho < 0.45$ 时对于不同的 R_s , 对交通流的影响仅存在微小区别; 而当 $\rho > 0.45$ 时, 不同的 R_s 对应的交通流流量以及平均速度之间存在明显的区别, 说明在高密度下车道空闲空间的多少对交通流有很大的影响.

下面讨论当养护路段长度相同而在不同车道中时对交通流的影响差异. 图 7 和图 8 分别是 R_s 为 10% 和 20% 时的空间占有率与流量、空间占有率与平均速度关系图.

从图 7(a) 和图 8(a) 可以看出, 当 $\rho < 0.05$ 时, 随着 ρ 的增大, 交通流流量都在增大, 只是增大的幅度略有不同. 养护路段在第一车道与没有养护路段时的流量增大幅度相同, 而养护路段在第二车道时对应的流量增大幅度略小. 同时由图 7(b) 和图 8(b) 可以看到, 当 $\rho < 0.05$ 时, 养护路段在第一车道中与没有养护时的平均速度相同, 而养护路段在第二车道中时对应的平均速度却要比以上两种情况小. 说明在低密度下, 单车道中养护路段对交通流的影响不大, 养护路段在第二车道中时比在第一车道中对交通流的影响明显.

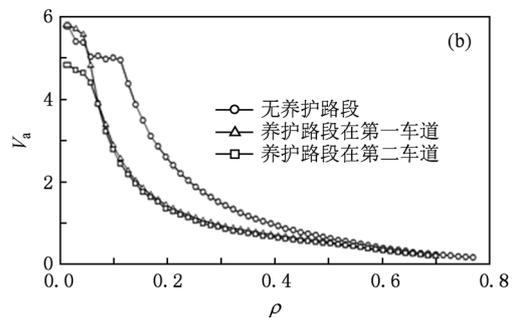
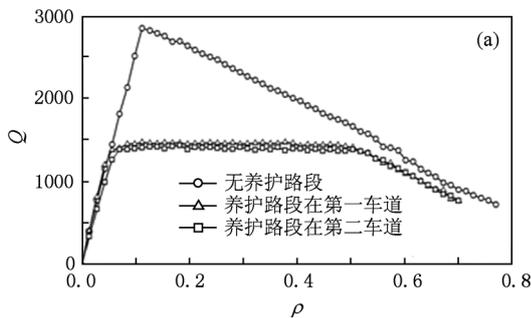


图 7 R_s 为 10% 时 (a) ρ - Q 和 (b) ρ - V_a 关系图

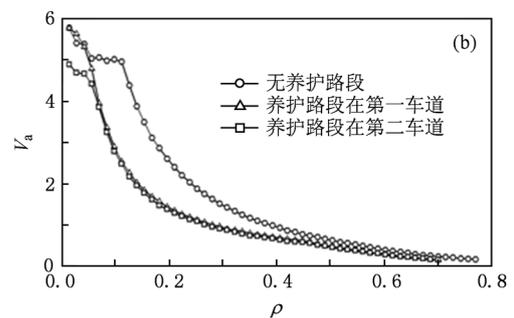
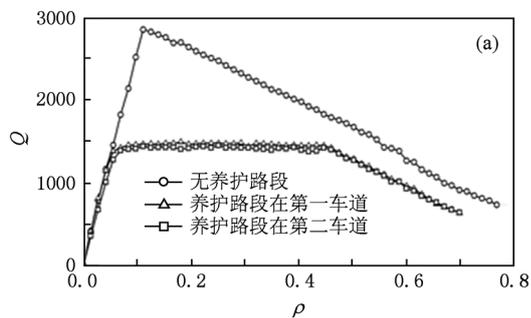


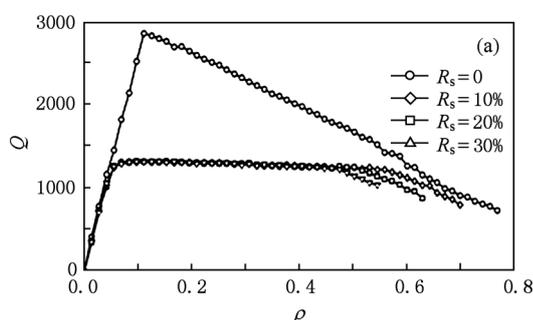
图 8 R_s 为 20% 时 (a) ρ - Q 和 (b) ρ - V_a 关系图

随着 ρ 的增大, 无养护路段对应的流量在 $\rho < 0.12$ 时还在继续大幅度的增大; 而存在养护路段时对应的流量则不再继续增大, 在 $0.05 < \rho < 0.45$ 之间, 流量变化很小. 说明空间占有率在增大到这个

阶段时, 养护路段造成的瓶颈已经对交通流产生严重的影响. 同时也发现在这个阶段养护路段在第一车道时对应的流量比在第二车道时的流量略大, 而随着 ρ 的增大, 当 $\rho > 0.45$ 时, 两种情况下的流量趋

于一致,但是比没有养护路段时对应的流量低.说明在这个阶段,车辆密度较高养护路段对交通流有很大的影响,同时较高的车流密度使得车辆之间的黏滞系数加大,无论第一车道还是第二车道中的车道空闲空间减少,从而使得养护路段对交通流的影响随着 ρ 的增加而减弱.

由以上分析可知,在车道管制下养护路段在 $\rho < 0.05$ 时对交通流的影响不是很大,而当 $\rho > 0.05$ 时养护路段就会对交通流产生严重影响.同时,养护路段在第一车道和第二车道,在 $\rho < 0.45$ 对交通流的影响之间有差别,养护路段在第二车道时比在第一车道对交通流的影响略微明显,而在 $\rho > 0.45$



时,由于车辆密度较大,养护路段在不同车道对交通流的影响之间的差异消失.

3.2.2. 两车道养护对交通流的影响

在双向六车道中由于最外侧车道不考虑,当有一个方向上的两个车道全部养护时,为维持高速公路正常运营,该方向的车辆只能从对向的第一车道绕行,对向车辆从对向第二车道绕行类似于单车道绕行,在这里不作讨论.

图9(a)和(b)分别为两车道养护且养护路段比 R_s 为 0, 10%, 20% 和 30% 时的车辆空间占有率与流量关系图和车辆空间占有率与平均速度关系图.

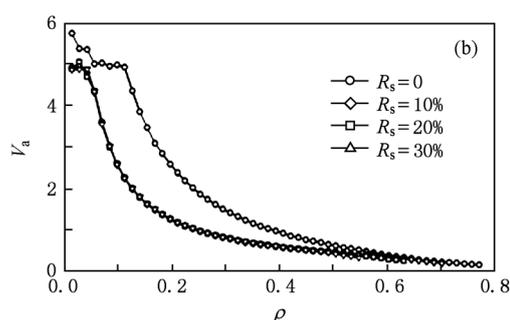


图9 不同长度的养护路段下(a) ρ - Q 和(b) ρ - V_a 关系图

由图9(a)可以看到当 $\rho < 0.05$ 时,无养护路段即 R_s 为 0 与 R_s 为 10%, 20% 和 30% 对应的流量都随着车辆空间占有率的增大而增大,只是存在养护路段时的流量增大幅度比没有养护路段时的增大程度略小,而 R_s 为 10%, 20% 和 30% 对应的流量增大趋势一致.说明在低密度下即使双车道全部封闭养护,对整个路段的交通流流量影响也不是很大.然而由图9(b)中可以看到当 $\rho < 0.05$ 时,存在养护路段时对应的平均速度比无养护路段时的平均速度普遍要小.这是由于在模拟时设定车辆在遇到养护路段绕行驶入以及驶出对向第一车道时全部需要减速,所以整个路段全部车辆的平均速度就会相应的减小.

当 $0.05 < \rho < 0.45$ 时,随着车辆空间占有率的增大,存在养护路段时对应流量就稳定在 1300 左右,而不像没有养护路段时对应的流量增大到 2900 后逐渐减小.说明在这个阶段养护就会对整个路段上的交通流产生影响,对向单车道的绕行路段限制了整个路段的交通流流量.由图9(a)可以看出当 $\rho > 0.45$ 时,随着车辆空间占有率的增大,存在养护路段时对应的流量有减小趋势,同时 R_s 为 10%,

20% 和 30% 时对应的交通流流量的减小趋势就逐渐有所不同. R_s 为 30% 对应的流量首先减小,然后是 R_s 为 20% 对应的流量,最后是 R_s 为 10% 对应的流量.同时,由图9(b)可以看出,当 $\rho > 0.05$ 时,不论有无养护,车辆的平均速度都在下降,下降幅度随着 ρ 的增大逐渐减小;而且不论养护路段的长短,只要有养护车辆的平均速度都比没养护时小, R_s 为 10%, 20% 和 30% 时的平均速度变化趋势和大小都一致.说明这个阶段车流密度加大,车道的空闲空间对交通流的顺畅程度有很大的影响.随着养护路段的增长,车流拥挤程度会加重,从而使得整个路段的交通流流量减小.

图10(a)和(b)分别为养护路段比 R_s 为 10% 不同车道养护时对应的车辆空间占有率与流量关系图和车辆空间占有率与平均速度关系图.

由图10(a)可以看到,当 $\rho < 0.05$ 时,养护路段在不同车道以及无养护时对应的流量随着 ρ 的增大而增大,其中增大的幅度有所不同;无养护路段和养护路段在第一车道时流量增大的幅度类似;而养护路段在第二车道和两车道养护时增大幅度类似,比无养护路段和养护路段在第一车道时的流量增

大的幅度略小. 同样由图 10(b) 可以看到, 在 $\rho < 0.05$ 时, 无养护路段与养护路段在第一车道对应的平均速度比养护路段在第二车道和两车道养护时对应的平均速度大. 由图 10(a) 可以看到, 随着 ρ 的增大, 当 $\rho > 0.05$ 时, 存在养护路段时对应的交通流量不再增大, 而是稳定在各自的最大流量附近. 这些最大流量之间的差异不大, 其中养护路段在第一车道时对应的交通流量最大, 养护路段在第

二车道次之, 两车道养护时最小. 由图 10(b) 也可以看到, 在这个阶段养护路段在第一车道中对应的平均速度最大, 而两车道养护时对应的流量最小. 说明在这个阶段通行效率由大到小排列顺序为: 养护路段在第一车道、养护路段在第二车道、两车道养护. 由 10(a) 和(b) 可见, 当 $\rho > 0.58$ 时, 3 种养护方式对应的流量和平均速度趋于一致. 说明在高密度下, 两车道养护与单车道养护同样拥挤.

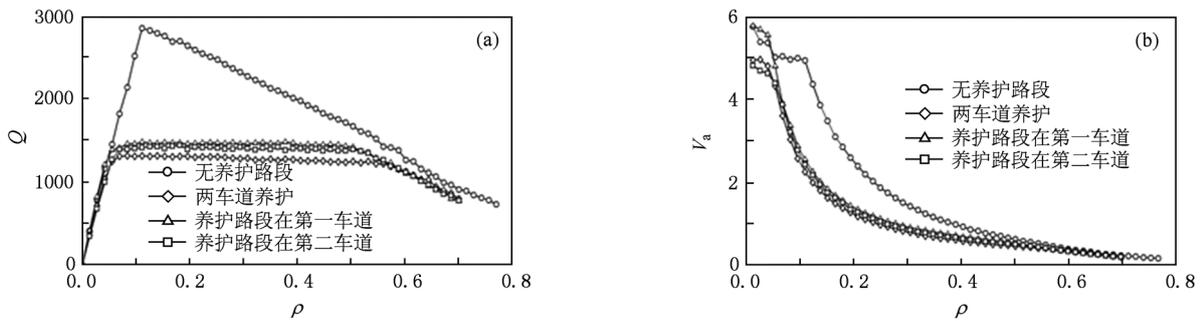


图 10 不同车道养护时(a) ρ - Q 和(b) ρ - V_a 关系图

两车道养护导致车辆从对向第一车道绕行. 通过以上讨论, 发现当 $\rho < 0.05$ 时, 对整个路段交通流的影响不大, 交通流流量变化和单车道养护中的第二车道养护类似; 当 $0.05 < \rho < 0.58$ 时, 两车道养护时流量基本稳定在 1250 左右, 比单车道养护时的稳定值略小; 而当 $\rho > 0.58$ 时, 由于车流密度较大, 车辆拥挤程度高, 从而导致两车道养护与单车道养护对交通流的影响之间无差异.

4. 结 论

通过在车道管制下的交通流元胞自动机模型中引入意外事件, 模拟了车道管制下的高速公路上发生意外事件时对交通流的影响. 首先讨论了交通事故对交通流的影响, 进而研究了道路养护对交通流的影

响. 在研究中同时分析了空间占有率与流量和空间占有率与平均速度之间的关系. 车辆行驶的平均速度作为交通流流量的表现形式, 有利于对高速公路上发生意外事件时交通流流量的准确分析. 通过研究得到以下结论: 1) 在低密度下, 意外事件发生在第一车道时对交通流的影响很小. 2) 当意外事件发生在第二车道时比发生在第一车道对交通流的影响更加明显. 同时尽量及时地处理事故车辆, 对保证道路的通行效率具有重要意义. 3) 道路的维修养护对交通流的影响很大, 特别是第二车道部分路段封闭维修养护时, 所以应尽量缩短维修养护的工期, 在对第二车道进行维护时, 如果条件允许可以在封闭路段前方改变管制措施. 4) 单方向上两个车道养护时, 对交通流的影响最为明显, 由于路面空间的明显减少, 该情况对道路通行能力的限制的作用最为明显.

[1] Busch F, Fellendorf M 1990 *Traf. Engng Contrl.* **4** 221
 [2] Sheu J B, Ritchie S G 1998 *Trans. Res. C* **4** 315
 [3] Qian Y S, Zhao S X, Guang X P 2005 *J. Lanzhou Jiaotong Univ.* **1** 130
 [4] Wolfram S 1983 *Los Alamos Sci.* **9** 42
 [5] Nagel K 1995 *Ph. Dissertation* (Köln: University of Cologne)
 [6] Qian Y S, Shi P J, Zeng Q, Ma CH X, Lin F, Sun P, Yin X T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 4033

[7] 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]
 [8] Li S C, Kong L J, Liu M R, Zheng R S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2266 (in Chinese) [李盛春、孔令江、刘慕仁、郑容森 2009 物理学报 **58** 2266]
 [9] Lei L, Xue Y, Dai S Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷丽、薛郁、戴世强 2003 物理学报 **52** 2121]

- [10] Tan H L, Huang P H, Li H B, Liu M R, Kong L J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1127 (in Chinese)[谭惠丽、黄兵花、李华兵、刘慕仁、孔令江 2003 物理学报 **52** 1127]
- [11] Wu J J, Sun H J, Gao Z Y 2008 *Phys. Rev. E* **78** 036103
- [12] Li X G, Gao Z Y, Li K P, Zhao X M 2007 *Phys. Rev. E* **76** 016110
- [13] Tang T Q, Huang H J, Gao Z Y 2005 *Phys. Rev. E* **72** 066124
- [14] Qian Y S, Shi P J, Zeng Q, Ma CH X, Lin F, Sun P, Yin X T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4037
- [15] Qian Y S, Wang H L 2007 *J. Syst. Simul.* **14** 58 (in Chinese) [钱勇生、汪海龙 2007 系统仿真学报 **14** 58]
- [16] Hu S X, Gao K, Wang B H, Lu Y F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1863
- [17] Li X G, Gao Z Y, Jia B, Jiang 2009 *Physica A* **388** 2051
- [18] Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Gao Z Y, Zhang Y 2009 *Commun. Theor. Phys.* **51** 71
- [19] Huang P H, Kong L J, Liu M R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 30 (in Chinese)[黄兵花、孔令江、刘慕仁 2001 物理学报 **50** 30]
- [20] Lü X Y, Kong L J, Liu M R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1255 (in Chinese)[吕晓阳、孔令江、刘慕仁 2001 物理学报 **50** 1255]
- [21] Sheng P, Zhao S L, Wang J F, Tang P, Gao L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3347
- [22] Li X L, Kuang H, Song T, Dai S Q, Li Z P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2366
- [23] Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Jiang R 2009 *Chin. Phys. B* **18** 975
- [24] Hu S X, Gao K, Wang B H, Lu Y F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1863
- [25] Jiang R, Jin W L, Wu Q S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 829
- [26] Gao K, Wang B H, Fu C J, Lu Y F 2007 *Chin. Phys. B* **16** 3483
- [27] Tang C F, Jiang R, Wu Q S 2007 *Chin. Phys. B* **16** 1570

Cellular automaton traffic flow model considering influence of accidents*

Qian Yong-Sheng[†] Zeng Jun-Wei Du Jia-Wei Liu Yu-Fei Wang Min Wei Jun

(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(Received 14 July 2010; revised manuscript received 10 August 2010)

Abstract

Based on the NaSh model, considering the influence of traffic accident and maintenance of highway sections on traffic flow, the cellular automaton model of highway traffic flow under the lane control is established when accident occurs. And the relevant data of the model are calculated. Through analyzing the results of numerical simulation it is found that the accident has a great influence on the highway traffic flow and considerably on traffic flow density within a certain range. And the influence of the accident blocking point on traffic flow on lane 1 is less than on lane 2. Meanwhile, in this range of traffic flow density, the longer the blocking time and the length of blocking section, the greater the influence of traffic flow is.

Keywords: cellular automaton, traffic flow, accidents

PACS: 05.10.Gg

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 09XJY029).

[†] E-mail: qianyongsheng@mail.lzjtu.cn