

基于元胞自动机模型的高架路交织区交通流的研究^{*}

雷 丽¹⁾ 董力耘²⁾ 宋 涛²⁾ 戴世强²⁾

1) 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061)

2) 上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

(2005 年 5 月 5 日收到, 2005 年 12 月 9 日收到修改稿)

高架道路上的交织区时常成为交通瓶颈. 以 Nagel 和 Schreckenberg 提出的 NS 元胞自动机交通流模型为基础, 考虑到换道因素, 对高架路主线为单车道时的交织区路段进行了数值模拟和分析. 结果表明: 当交通流稀疏时, 车流的交织行为对系统影响不大, 即使加大交织区长度, 整个系统的交通流参数也变化不大; 当交通流拥挤时, 交织行为会对系统产生不良影响, 此时加大交织区长度, 可以改善整个系统的交通流状况. 模拟结果显示, 交织区长度并非越大越好, 工程设计中选取一个适宜的中间值, 整个系统就可以获得很好的运行效果.

关键词: 交通流, 元胞自动机模型, 高架路, 交织区

PACC: 0550, 0520

1. 引 言

高架道路目前已成为国内一些大中城市交通运行系统的重要组成部分, 在居民出行中发挥着举足轻重的作用. 据 2000 年 4 月统计, 上海市高架道路网的日服务车辆数达 91 万辆, 承担市中心机动车交通的 50% 左右^[1]. 在高架道路系统中, 有一种情况非常值得关注: 在上匝道的下游不远处紧接着是一个下匝道, 并且两个相邻匝道的距离较近时, 会形成交通冲突区, 即交织区. 上海市高架道路系统存在着多处这样的交织区路段, 部分车辆的强迫交换车道行为集中在非常有限的长度范围内进行, 使得车流呈高度紊乱状态, 造成该路段的实际通行能力大大降低. 频繁地更换车道和车辆之间复杂的相互作用, 使交织区路段经常成为高架道路上的交通瓶颈.

交织区的交通流行为比较复杂, 对其研究具有重要的现实意义, 因此引起了国内外不少学者的兴趣和关注. 文献 [2] 综述了国内外交织区运行分析的研究成果, 并对现有的各种分析方法进行了评价. 陈小鸿等^[3]利用 VISSIM 对立交交织区的交通特性进行研究, 并将所得结果与 HCM 经验公式的计算结果进行对比. 文献 [4] 提出了一种实时的车辆追踪系统, 它能够在很多复杂情况下稳定运行, 可以提供

交织区段的交通数据. 基于间隙接受理论和线性优化方法, 文献 [5] 发展了对匝道交织区的通行能力进行评价的新方法, 同时指出通行能力会随着交织流量和非交织流量的比例而发生变化. Thomas 等^[6]根据实际的交通事故数据, 对三种不同的交织区类型对应的交通事故率进行了研究. 利用回归分析和神经网络理论, 文献 [7] 提出了两种交织区段的通行能力预估模型.

作为一种离散性微观模型, 元胞自动机模型关注交通流中个体车辆的运动状态, 可以方便灵活地修改其更新规则, 从而适应各种实际的交通条件和状况^[8-11]. 为了细致刻画并对高架路上的车流交织行为开展研究, 本文选用一维的元胞自动机模型对交织区段进行数值模拟, 通过设置合理的车道变换规则, 分析了交通流量、交织车辆的比例以及交织区长度等参数对交织路段交通所产生的效果和影响.

2. 交织区问题的数学建模

考虑到交织区路段的车流呈高度紊乱状态, 车辆几乎无法按照期望速度行驶, 所以, 单个车辆状态的更新和演化, 我们选用可以逐步加速的 NS 元胞自动机模型. NS 模型由 Nagel 和 Schreckenberg^[12]于 1992 年提出, 目前已经得到了非常广泛的推广和应

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10202012, 10532060)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20040280014)资助的课题.

用^[13-16]. 假定车辆随机地分布在一维离散的格点链上,第 n 辆车的速度 $v_n \in [0, v_{\max}]$, v_{\max} 表示最大速度. 模型考虑了车辆加速、减速、随机慢化和位置更新四个过程. 第一阶段为加速: 只要车辆速度没有达到 v_{\max} 就增加 1, 即 $v_n \rightarrow v_n + 1$; 第二阶段为减速过程: 如果 $v_n > x_{n+1} - x_n - 1$ (x_n 和 x_{n+1} 分别表示第 n 辆车与前方紧邻的第 $n+1$ 辆车的位置), 则 v_n 降至前后车的净间距 $x_{n+1} - x_n - 1$, 从而避免与前车的碰撞; 第三阶段为随机慢化: 车速 v_n 以概率 p 降低 1, 即 $v_n \rightarrow v_n - 1$, p 为随机慢化概率, 这样做是考虑到驾驶员的过度反应并且增加安全性; 第四阶段为位置更新: 车辆以新获取的速度 v_n 向前更新位置.

交织区内合流点与分流点之间有辅道连接, 大致如图 1 所示. 交织区问题, 实际上是在相对固定的位置处车辆交换车道的问题, 亦即上下匝道的车辆必须在交织区的有限长度内变换车道, 然后到达各自的目标方向. 图 1 中的交织区可以简化为图 2 的示意图. 中间的交织区段包含着两条车道, 上面为高架路主线的最外侧车道, 下面是上下匝道连接形成的辅道, 这里仅考虑了高架路主线为单车道的情况.

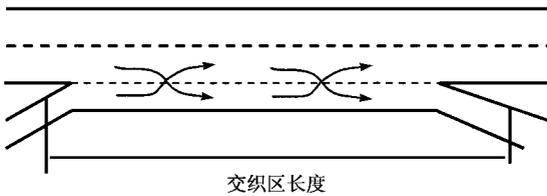


图 1 高架路上下匝道相距较近时形成的交织区简图

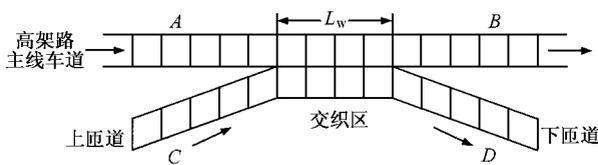


图 2 高架道路交织区段示意图

为了表述方便,我们将高架路主线车道交织区的上游和下游分别记为路段 A 和 B , 上匝道和下匝道分别记为 C 和 D . 模拟计算时路段 A, B, C, D 的长度均取为 500 m , 等分为 100 个元胞, 每个元胞的长度为 5 m . 交织区段的长度为 L_w 个元胞, 上匝道来的车辆和高架路主线下匝道的车辆在这个有限的长度里合流、交汇. 在交织区段, 上匝道车辆换至主线车道, 主线上的下匝道出流换至辅道, 两股车流的

换道行为都要遵循相应的换道条件, 在交织区以外的其他路段(如 A, B, C, D 段)上, 车辆的位置按照单车道 NS 模型的规则进行更新.

交织区路段内的车道变换属于强制性换道, 因此换道条件比较简单. 在双车道模型的位置更新过程中, 每个时间步可以划分为两个子时间步: 第一个子步, 车辆根据是否满足换道条件平行地更换车道; 第二个子步, 车辆像在单车道一样按照 NS 模型规则更新位置. 假设意欲换道的车辆位置为 x_1 , 目标道上前车和后车的位置分别为 x_2 和 x_3 . 如果 1 车满足如下条件: $x_2 - x_1 - 1 \geq 0$ 且 $x_1 - x_3 - 1 \geq 0$, 它就会以一定的换车道概率变换车道. 这表明, 只要目标车道平行位置的元胞没有被任何车辆占据, 1 车就会以一定的概率变换车道, 然后像在单车道一样按照模型规则更新位置.

对于上匝道来流, 车辆的换道进行强制性处理: 所有车辆只要符合上述的换道条件, 均在 L_w 路段内换至高架路主线车道, 辅道最右端的元胞对上匝道车辆而言是“刚性的”固定边界, 如果到达该元胞时还没有成功换道, 车辆就要在此处停下来等候合适的换道机会. 所以上匝道车辆的换道动机非常强烈, 将其换车道概率取为 1. 对于高架路主线准备下匝道的车辆, 我们采用“柔性”方式处理: 不事先标记主线上的下匝道车辆, 而是利用高架路主线车辆的换车道概率 p_{ex} 的大小来调节下匝道出流车辆的比例 ($0 \leq p_{\text{ex}} \leq 1$). p_{ex} 数值越大, 表示变换车道的车辆越多, 主线下匝道出流车辆的比例也越大. 这样做是虑及所研究的高架路主线为单车道, 如果对主线下匝道的车辆作如同上匝道车辆一样的“刚性”边界处理, 当下匝道车辆不能顺利换至辅道时, 会在主线车道交织区段的末尾元胞处停下来等候, 阻止主线上直行车辆的通行. 这不太符合交通实际, 因为现实中的直行车辆通常可以绕行换道至高架路主线的内侧车道继续行驶. 对于此处经过简化的高架路主线单车道情况, 对下匝道车辆进行上述的“柔性”处理能够较好地还原现实情况.

模型中采用开放性边界条件, 假设高架路主线车道和上匝道的入流条件相同, 即一辆速度为 v_{\max} 的车以入流概率 α 和 β 分别进入主线车道和上匝道的元胞 $\{\max(\min(f(v_{\max}, c), x_1), 1)\}$. 这里 f 为取整函数, 并要求 $f(x) \leq x$; c 为 $[0, 1]$ 之间任意的一个随机数; x_1 为车流中最后一辆车的位置. 高架路主线车道和下匝道的出流条件为自由出流, 即车流的

头车到达尾端元胞后将驶出系统,紧邻的下一辆车成为新的头车.

如上所述,模拟中将路段 A, B, C, D 都划分为 100 个元胞,交织区路段为 L_w 个元胞.选取高架路主线车道上车辆的最大速度 $v_{max} = 3$,上匝道、下匝道和辅道上车辆的最大速度 $v_{max} = 2$.NS 模型的随机慢化概率为 p .主线车道车辆的换车道概率为 p_{ex} .实际模拟中,每一次运行取 25000 个时间步进行数值模拟,开始的 5000 个时间步不进行统计,以便消除暂态的影响,我们利用 20000 个时间步内通过一个虚拟探头的车辆数来确定交通流量的数值.

3. 数值模拟结果与讨论

我们在数值模拟中将交织区段的长度 L_w 取为 20 个元胞,即约合实际长度为 100 m.取随机慢化概率 $p = 0.2$.主线车道和上匝道的入流概率分别为 α 和 β .

相图以入流流量的临界相变点来区分各个相区,能够给出整个系统的宏观信息,直观地反映交通流的组织情况.在图 3 中,我们给出了 p_{ex} 不同时以

(α, β) 为相空间的相图.图 3(a),(b),(c),(d) 分别对应着 $p_{ex} = 0, 0.2, 0.4, 1.0$ 时的情况. $p_{ex} = 0$ 表示所有的高架路主线车辆不变换车道,全部直行,此时下匝道的车辆数为零. $p_{ex} = 1.0$ 表示高架路主线上的车辆只要满足换车道条件,就会在交织区段变换车道至辅道,然后进入下匝道行驶.当 $0 < p_{ex} < 1$ 时,高架路主线上的车辆即使满足换车道条件,也会根据相应的概率确定是否变换车道.图 3 中的所有相图均包含四个相区:在 I 区中,主线 A 车道和上匝道 C 段上均为自由流;在 II 区中,上匝道变为拥挤状态,而主线 A 车道仍为自由流状态;在 III 区中,主线 A 车道为拥挤流状态,而上匝道 C 段是自由流;在 IV 区中,主线 A 车道和上匝道 C 段的车辆都处于拥挤流状态.从图 3 可以看出,当其他条件固定不变,仅换车道概率 p_{ex} 由零增大时,相图的 II 区逐渐扩大,III 区有所减小.这表明随着 p_{ex} 的增大,由主线车道向下匝道方向行驶的车辆数增多,这些车辆的变换车道行为恶化了辅道上的交通状况,进而向上游传播到上匝道,使上匝道很容易发生拥挤,导致 II 区的扩张.由于上匝道车辆的换车道概率恒为 1,图 3 中由上匝道换道至主线的车辆数不会有突

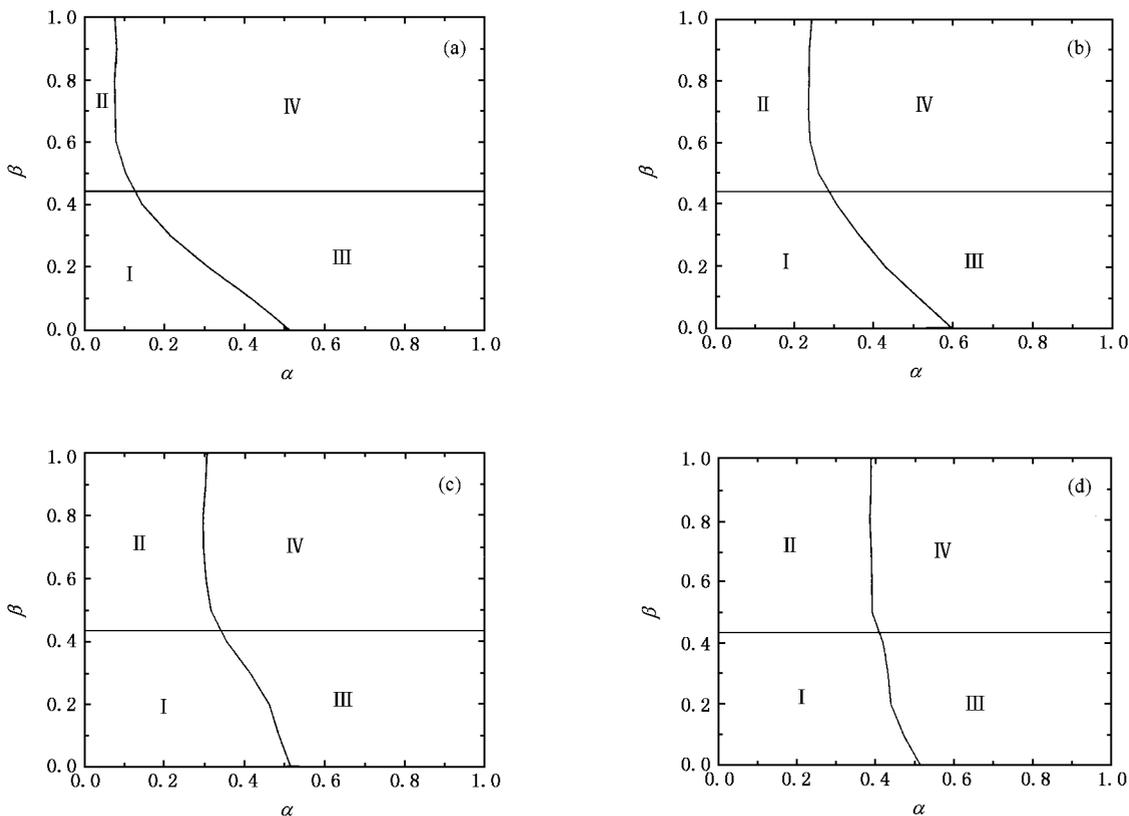


图 3 当 $L_w = 20, p = 0.2$ 时,不同的 p_{ex} 下系统的相图 (a) $p_{ex} = 0$ (b) $p_{ex} = 0.2$ (c) $p_{ex} = 0.4$ (d) $p_{ex} = 1$

变,所以伴随着 p_{ex} 的增大,主线向下匝道方向驶出的车辆增多,直行车辆数会相应减少,从而适当改善了主线的拥挤状况,III区随之减小.

下面我们选取 $p_{ex} = 0$ 和 $p_{ex} = 1$ 两种情况进行对比分析.前者对应主线上无下匝道车辆,此时在交织区段不存在车流的交织行为,只有上匝道车辆并入高架路主线车道的合流行为;后者对应着两股车流非常频繁的换车道所导致的大量交织行为.图4给出了在上述两种情况下,上匝道的入流流量随入流概率的变化关系.我们假定所有考察点主线车道和上匝道的入流概率都相同,即 $\alpha = \beta$ 作为横坐标,坐标值的大小表征了可能进入系统车辆数的多寡.纵坐标 $q_{in-ramp}$ 为上匝道的实际入流流量.从图4可以看出,当入流概率较小时(小于0.4),两组数据曲线基本重合,说明交通流比较稀疏时交织行为对系统的影响作用几乎体现不出来.此时,随着入流概率的增大,上匝道的实际入流流量会呈线性增长,说明交通流的状态比较稳定.但是,当入流概率较大时(大于0.4),来流车辆越来越多,此时上匝道的实际入流量基本保持不变,说明上匝道已经达到了最大通行能力.比较两组曲线,在同样的入流概率时,从 $p_{ex} = 0$ 变化到 $p_{ex} = 1$,上匝道的实际入流流量降低,通行能力下降.这说明随着 p_{ex} 的增大,高架路主线下匝道的车辆增多,两股车流的交织行为非常频繁,导致上匝道车辆的入流受阻,入流流量下降.这表明当交通流比较拥挤时,交织区的车辆交织行为会对系统的交通流状况产生不良影响.

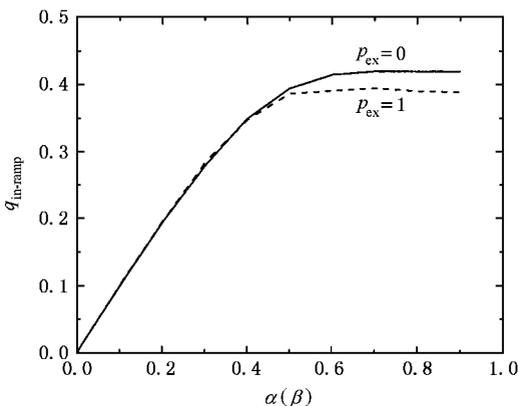


图4 不同换车道概率下,上匝道入流流量随入流概率的变化曲线

与图4相对应,我们还绘制了不同换车道概率下,辅道上的车流密度随入流概率的变化曲线,如图

5所示.由图5可以看出,当主线上的换车道概率从 $p_{ex} = 0$ 变化到 $p_{ex} = 1$ 时,辅道上交织区段的车流密度急剧增加,说明主线下匝道车辆的增多会严重恶化交织区段的交通状况.两组曲线的密度差随着入流概率的加大而增长,表明交通流越拥挤交织行为对辅道上的交通状况影响就越剧烈.当入流概率大于0.4时,由于上匝道的入流流量已经达到最大值,辅道上交织区段的车流密度也基本不再变化.

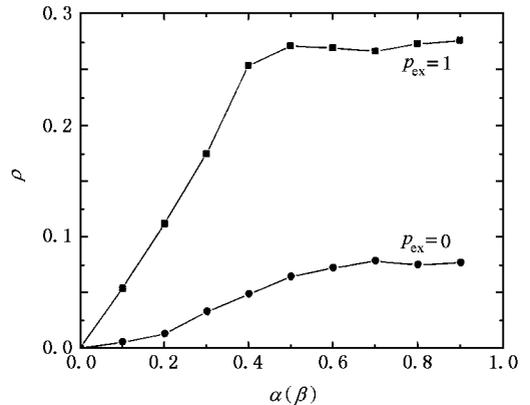


图5 不同换车道概率下,辅道上的车流密度随入流概率的变化曲线

由此看来,交通流较为拥挤时,交织区车辆的交织行为会对系统总体的交通流状况产生不良影响.为了从工程设计上避免和削弱这种负面影响,我们考察交织区长度的变化对交通流状态的影响.选取交织区段所对应的元胞个数 L_w 分别为10, 20, 40, 60, 80, 100几种情况进行对比研究.NS模型的随机慢化概率 $p = 0.2$.

我们设定主线车道的换车道概率 $p_{ex} = 0.2$,绘制了几种不同的入流概率下,系统的交通流参数随交织区长度变化时的一组关系曲线,如图6所示.由图6(b)所示的相图可知,四种入流概率下对应的系统状态有所不同,前两者位于I区内,交通流处于自由流状态;后两者位于IV区内,交通流呈拥挤状态.

图6中的各组图形分别表示了不同交织区长度下交通流参数的变化趋势.参数包括下匝道的出流量 q_D ,主线车道交织区段上的密度 ρ_{L_w} 以及主线车道B段上的密度 ρ_B .由图6可以看出:当 $\alpha = \beta = 0.1$ 时,匝道和主线上都处于自由流状态,车辆可以比较通畅地运行.此时,交织区长度发生变化,对各个交通流参数的影响不大.当 $\alpha = \beta = 0.3$ 时,交织区段的长度 L_w 由10增大至100个元胞时,

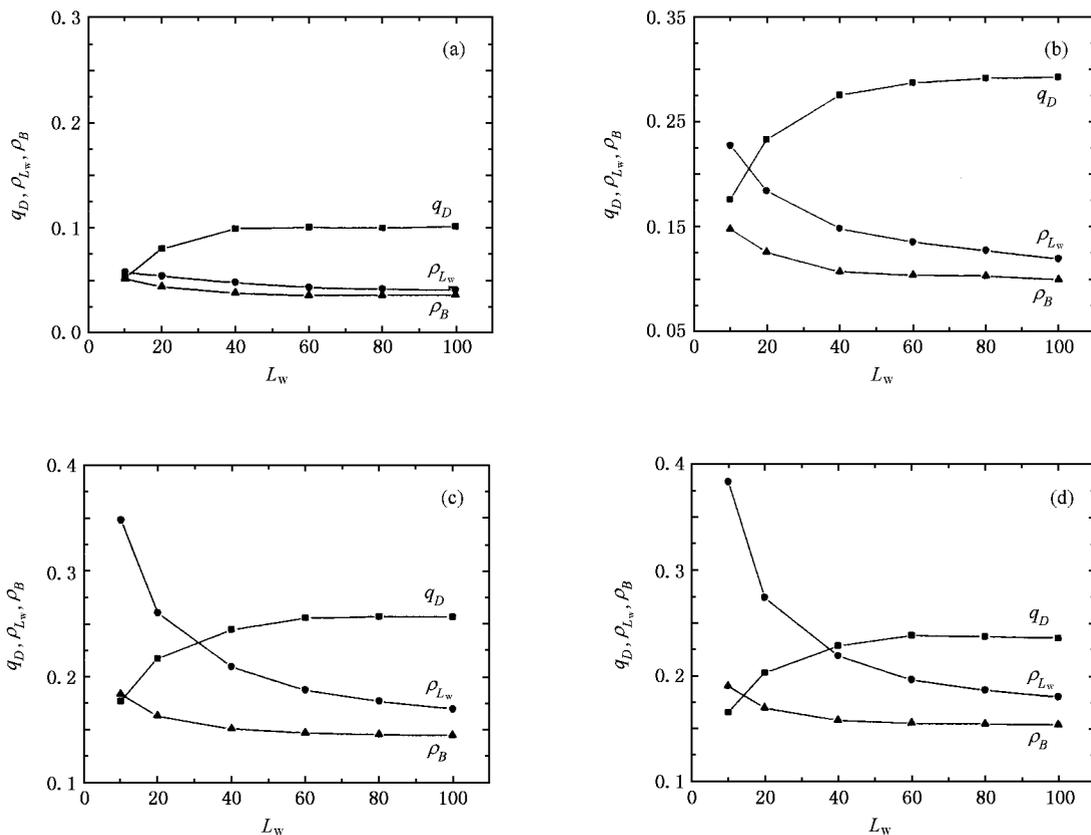


图 6 不同入流概率下,系统的交通流参数随交织区长度的变化曲线 (a) $\alpha = \beta = 0.1$ (b) $\alpha = \beta = 0.3$ (c) $\alpha = \beta = 0.5$, (d) $\alpha = \beta = 0.7$

下匝道的出流量越来越大,表明在其他参数完全相同的条件下,交织区段加长,主线下匝道的车辆更容易完成变换车道的行为,顺利换道使得下匝道 D 段上的出流流量有所增加.与此同时,加长交织区段,主线上的交织段密度和下游 B 段的密度都呈下降趋势,说明主线上的交通流状况得到了改善.当 $\alpha = \beta = 0.5$ 和 $\alpha = \beta = 0.7$ 时,由对应的相图可知,此时匝道和主线上的车流较为拥挤,与 $\alpha = \beta = 0.3$ 的情形相比较,相同的交织区长度所对应的下匝道出流流量下降,主线上交织区段和下游的密度增大.从各条曲线的走势来看,图 (c)(d) 中交织区长度的变化对系统交通流的影响更加显著,尤其在交织区段的密度曲线上反映最为明显.随着交织区长度增加,主线上交织区段的车流密度大大降低.这表明在交通高峰时段交通流比较拥挤时,增大交织区长度可以明显改善交织区及其附近路段的交通流状况.

图 7 所示的是上述几种入流概率下,主线车道全线上的车辆平均速度 v 随交织区长度 L_w 的变化曲线.当 $\alpha = \beta = 0.1$ 和 $\alpha = \beta = 0.3$ 时,主线车道上的车流处于自由流状态,车速接近于最大速度 v_{max}

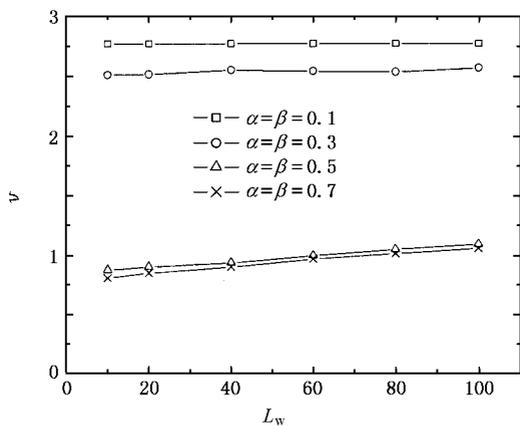


图 7 不同入流概率下,主线车道的平均车速随交织区长度的变化曲线

$= 3$, 并且对交织区长度的变化非常不敏感,车速变化几乎呈水平直线.随着入流概率的增大,车流逐渐呈拥挤状态.当 $\alpha = \beta = 0.5$ 和 $\alpha = \beta = 0.7$ 时,与前两种入流概率时相比,主线上的平均车速大大降低.此时伴随交织区长度的增加,平均车速呈增长趋势,说明主线上的交通流状况得到了改善.

从图 6 我们还可以看到, 交织区长度 L_w 对系统交通流的影响并不呈线性变化. 当 $L_w < 40$ 时, 交织区长度的增加对各个交通流参数的影响作用明显, 该段曲线的斜率较大. 当 $L_w > 40$ 时, 交通流参数对于交织区长度的继续增大反应并不敏感, 该段曲线的走势趋向平直. 由此看来, 如果我们选取交织区段的长度为 $L_w = 40$ 个元胞, 即实际的路段长度为 200 m 时, 无论车流处于畅通或是拥挤状态, 下匝道出流流量、交织区段及其下游密度等交通流参数都表征系统处于较好的运行状态. 所以, 交织区长度并非越长越好, 可以选取一个比较适宜的中间数值, 整个系统就可以获得很好的运行效果.

4. 结 论

本文以 NS 元胞自动机模型为基础, 考察并研究了高架路主线为单车道时的交织区路段. 通过数值模拟和分析, 得到了相应的结果.

1) 当交通流比较稀疏时, 交织区段的交织行为对系统的交通流影响不大; 当交通流比较拥挤时, 车辆交织行为会对系统的交通流状况产生不良影响.

2) 当上匝道和主线上都处于非常通畅的运行状态时, 交织区长度发生变化, 对系统各个交通流参数的影响不大. 伴随着入流概率的逐渐增大, 车流趋于拥挤状态, 交织区长度变化对整个系统的交通流状况影响作用越来越大. 交织区段加长, 下匝道的出流流量和主线上的平均车速均有所增加, 主线上交织区段及其下游路段的车流密度都呈下降趋势, 说明整个系统的交通流状况都得到了很大改善.

3) 交织区长度有一个临界值(大约为 200 m), 当小于该值时, 交织区的车辆交织行为会严重影响高架道路交通; 当大于该值时, 交织行为对系统交通流的不良影响趋于平缓. 所以, 交织区长度并非越大越好, 工程设计中可以选取一个比较适宜的中间值, 整个系统就可以获得很好的运行效果.

- [1] Sun L J , Hu J L , Chen J Y *et al* 2001 *Proc. 2000 Shanghai Inter. Symp. Intel. Traf. Manag.* (Shanghai : Tongji University Press) p19 (in Chinese) [孙立军、胡家伦、陈建阳等 2001 2000 年上海国际智能交通及管理技术研讨会论文集(上海 : 同济大学出版社) 第 19 页]
- [2] Chen J C , Liu X M , Ren F T *et al* 2000 *J. High. Trans. Res. Dev.* **17** 46 (in Chinese) [陈金川、刘小明、任福田等 2000 公路交通科技 **17** 46]
- [3] Chen X H , Xiao H F 2001 *Chin. J. High. Trans. (Sup.)* **14** 88 (in Chinese) [陈小鸿、肖海峰 2001 中国公路学报(增刊) **14** 88]
- [4] Masoud O , Papanikolopoulos N P , Kwon E 2001 *IEEE Transac. Intel. Trans. Sys.* **2** 18
- [5] Ponlathep L , Lily E 2003 *Trans. Res.* **B** **37** 459
- [6] Thomas F G , Wilfred W R , Veronica M A 2004 *Trans. Res.* **A** **38** 35
- [7] Awad W H 2004 *Appl. Sof. Comp.* **4** 395

- [8] Dong L Y , Xue Y , Dai S Q 2002 *Appl. Math. Mech.* **23** 363
- [9] Tan H L , Huang P H , Li H B *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1127 (in Chinese) [谭惠丽、黄兵花、李华兵等 2003 物理学报 **52** 1127]
- [10] Kuang H , Kong L J , Liu M R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894 (in Chinese) [邝 华、孔令江、刘慕仁 2004 物理学报 **53** 2894]
- [11] Xue Y , Dong L Y , Dai S Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445 (in Chinese) [薛 郁、董力耘、戴世强 2001 物理学报 **50** 445]
- [12] Nagel K , Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I (France)* **2** 2221
- [13] Tan H L , Liu M R , Kong L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2713 (in Chinese) [谭惠丽、刘慕仁、孔令江 2002 物理学报 **51** 2713]
- [14] 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]
- [15] Ge H X , Dong L Y , Lei L *et al* 2004 *J. Shanghai Univ.* **8** 1
- [16] Zheng R S , Tan H L , Kong L J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3516 (in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江等 2005 物理学报 **54** 3516]

Study on the traffic flow of weaving section in elevated road system with cellular automaton model^{*}

Lei Li¹⁾ Dong Li-Yun²⁾ Song Tao²⁾ Dai Shi-Qiang²⁾

1) *School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China*

2) *Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China*

(Received 5 May 2005 ; revised manuscript received 9 December 2005)

Abstract

The weaving sections often turn into the bottleneck on the elevated roads. On the basis of the NS cellular automaton traffic model, the weaving section with one-lane main road was simulated and analyzed. For the free traffic flow, weaving almost has no influence on the system, even with increased weaving length. On the other hand, when the traffic flow is in congested state, weaving conflicts have negative effects on the system. The traffic condition will be improved with the increase of weaving length. Our simulation results suggest that the length of weaving sections need not to be inappropriately increased, and a proper moderate value should be chosen to get an optimal traffic condition.

Keywords : traffic flow, cellular automaton model, elevated road, weaving section

PACC : 0550, 0520

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10202012, 10532060) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant No. 20040280014).