

基于元胞自动机模型的上匝道合流处 交替通行控制的研究*

雷 丽¹⁾ 董力耘²⁾ 葛红霞³⁾

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)

3) 宁波大学理学院, 宁波 315211)

(2006 年 10 月 23 日收到, 2007 年 5 月 17 日收到修改稿)

上海市高架道路的上匝道合流处率先实施了交替通行的控制策略. 以 Fukui 和 Ishibashi 提出的 FI 元胞自动机交通流模型为基础, 对实施该策略前后的上匝道合流处分别建立合理的交通流模型, 并对交通流进行了数值模拟和分析. 结果表明: 当高架路主线和上匝道的来流车辆较多时, 交替通行控制可以大大改善高架道路交通; 当交通流稀疏时, 实施控制前后交通流状况基本不发生变化.

关键词: 元胞自动机模型, 上匝道合流处, 交替通行控制, 数值模拟

PACC: 0550, 0520

1. 引 言

近几年来, 上海市高架道路系统主线的部分路段与节点以及部分高架匝道所衔接的地面路口都出现了不同程度的交通拥挤, 严重影响了高架道路功能和效率的发挥. 匝道作为连接高架道路系统和地面道路系统的“桥梁”, 在城市立体交通网络中起着举足轻重的控制和调节作用.

国内外不少学者对匝道入口处的交通流开展了多方面研究, 得到一些很好的理论结果. 文献 [1] 建立了高架道路上匝道连接区车流运行的排队系统模型. 文献 [2] 运用概率分析和微分法建立了匝道车辆的汇入概率模型和行驶距离分布概率模型. 文献 [3] 不仅考虑到匝道对主道的作用, 同时考虑了主道对匝道的作用. 数值模拟结果表明, 匝道车流和主道车流是相互影响的. Lee 等^[4] 利用流体动力学模型对含匝道的高速公路路段进行了数值模拟, 发现在匝道附近存在车辆密度和速度的周期振荡状态. 当主干道入流流量和匝道流量发生变化时, 对出现的各种不同交通状态和亚稳定性开展了数值研究, 并找出两个非平凡的解析解^[5]. Helbing 等^[6,7] 采用气体

动力论模型对入口匝道交通状况进行数值模拟, 结果发现车辆驶过匝道时所产生的扰动会导致不同的拥挤模式, 有助于人们对相变行为的研究. 文献 [8, 9] 利用元胞自动机模型模拟了匝道效应. Berg 等^[10] 则利用车辆跟驰模型对匝道进行了模拟, 所得结果与宏观模拟结果^[5,7] 类似. Kerner^[11,12] 对入口匝道引起的瓶颈效应进行了详细观测, 研究了入口匝道引起的各种交通模式. 文献 [13] 对含相邻上下匝道的交织区交通流进行研究, 得到了合理的交织区长度.

2. 交替通行控制策略的实施

目前, 上海市高架道路交通在早晚高峰时段经常处于饱和甚至局部超饱和状态, 68 个高架上匝道有近 30 个上行困难, 拥堵现象较为严重. 由于上匝道与主线的合流处无信号灯控制, 车辆自行合流时容易相互抢道, 交通事故时有发生. 据统计, 2003 年 10 月上海市高架道路共发生交通事故 1136 起, 其中车辆违章变道发生事故 321 起, 占 28.3%, 而此类事故大部分都发生在上匝道合流处.

有序的交通流状态可以提高道路系统的交通安

* 国家自然科学基金(批准号: 10532060, 10672098, 10602025)资助的课题.

全^[14].根据《道路交通安全法》第 45 条规定,上海市交管部门确定在上匝道合流处实行“先到先行、交替通行”的控制策略.相关措施实行的两个多月中,在交替通行控制的上匝道交汇路口没有发生一起交通事故.交替通行控制的具体实施示意图如图 1 所示.在上匝道与主车道两车道的合流处,引导和指示车辆按“左侧车道—右侧车道—左侧车道”的顺序逐辆依次通行,达到按 1:1 的比例交替通行的目的.交替通行时,驾驶员需遵守如下原则:先到达交替通行起始线的车辆有先行权;当两条车道的车辆同时到达交替通行起始线时,左侧车道车辆优先通过,右侧车道车辆随后通过.图 2 示出了实施交替通行控制的实际路况,地面的齿轮状引导标线清晰可见.

元胞自动机模型作为一种微观交通流模型,关注个体车辆的运动状态,可以方便灵活地修改其更新规则,从而适应各种交通条件和实际路况^[15-23].本文从交通流建模的角度出发,利用元胞自动机模型研究上匝道合流处在实施交替通行控制前后的交通状态,通过数值模拟给出这条新的交通控制策略实施后的效果,科学评价和论证交替通行控制措施的合理性和可行性,使其推广和应用具有更加坚实有力的理论基础.

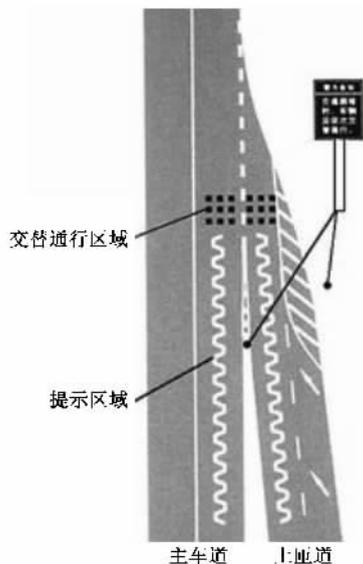


图 1 交替通行控制规则实施示意图

3. 交替通行控制的数值模拟

3.1. 数学模型

本文采用 Fukui 和 Ishibashi 于 1996 年提出的 FI



图 2 实施交替通行控制的实际路况

模型^[24].假设车辆随机地分布在长度为 L 的一维离散的格子链上,每个格子(即元胞)最多只能由一辆车占据, $x_n(t)$ 和 $v_n(t)$ 分别表示第 n 辆车在 t 时刻的位置和速度, v_{\max} 表示最大速度,则有 $v_n(t) \in [0, v_{\max}]$; $\Delta s_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - l$ 表示 t 时刻第 n 辆车与前方紧邻的第 $n+1$ 辆车的净间距.确定性 FI 模型的更新规则可分作三个阶段.第一阶段为加速过程,如果第 n 辆车的速度 $v_n(t)$ 尚未达到 v_{\max} ,均可以直接加速到最大速度 v_{\max} .第二阶段是为了避免交通事故而设定的,如果 $v_n(t) > \Delta s_n(t)$ 则 $v_n(t)$ 降至 $\Delta s_n(t)$ 从而避免与前车碰撞,这样赋予每辆车(如第 n 辆车)一个新的车速 $v_n(t)$.第三阶段中车辆以这一新获取的速度前进,即从原来位置 $x_n(t)$ 前进到 $x_n(t) + v_n(t)$.在上匝道与主干道合流处,两股平行车流总是相互抢道,驾驶员各不相让,有以最大速度行驶的主观愿望,故本文以 FI 模型为基础,对上匝道合流处进行数值模拟和分析.

3.2. 实施交替通行控制前的交通流状况

上匝道与主干道的合流处如图 3 所示.上匝道车流在与高架路外侧车道车辆交汇时有较长的加速车道,长度大约近百米.从上匝道驶入高架道路的车辆,要视主干线外侧车道车流中的适当间隙而进入、合流.由于上匝道车辆的合流对主干线交通的影响主要是在高架道路的外侧车道上,因此我们可以忽略内车道,将上匝道与主干道合流处的状态简化为如图 4 所示.上匝道车辆行驶到加速车道后,会判断

相邻的主干道上前车与后车的具体位置,然后根据间距大小而选择是否合流.考察的高架路段主干道的长度为 500 m,将其等分为 100 个格子(即元胞),每个格子的长度为 5 m.上匝道长度为 50 个格子,加速车道占据 10 个格子,与考察路段的第 51—60 个格子相平行.假设主干道和上匝道的车辆具有相同的最大速度 v_{\max} .

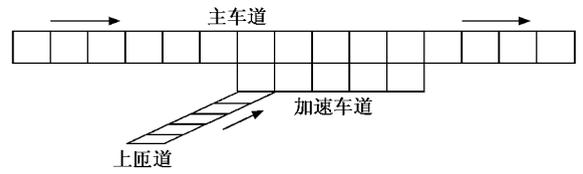


图 4 上匝道与主干道合流处的简化图

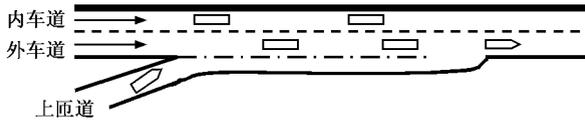


图 3 上匝道与主干道合流处示意图

由于上匝道合流处的加速车道长度有限,同时考虑到实际的交通运行情况,对于主干道上的来流,我们不允许其换道至加速车道,车辆只能沿着主干道行驶,位置按照单车道确定性 FI 模型的规则进行更新.对于上匝道的车辆,在匝道上按照确定性 FI 规则更新位置,当行驶到加速车道后必须在有限的长度内换道至主干道,因此需要确定合理的换车道

规则.假定加速车道上的车辆称为车辆 1,与其相对应的主干道平行位置上的后车和前车分别称为车辆 2 和车辆 3,各车辆的位置和速度均用 x 和 v 表示.如果车辆 1 满足条件 $x_1 \geq x_2$ 且 $\Delta s_{13} = x_3 - x_1 - l > 0$,它就会以概率 $p_1 = p_{ex}$ 变换车道至主干道, $p_{ex} < 1$ 是指由于驾驶员的心理状态和行驶习惯各不相同,满足上述条件的车辆不一定全部换道.为简单起见,我们在文中取 $p_1 = p_{ex} = 1$.如果不满足换道条件,车辆在加速车道上按照确定性 FI 模型的规则更新位置,当到达加速车道尾端最末格子时车辆就在原地等候,直到满足上述条件时换道至主干道.加速车道的车辆换道后,会同主干道上的车辆一起按照确定性 FI 模型的规则继续向前行驶.

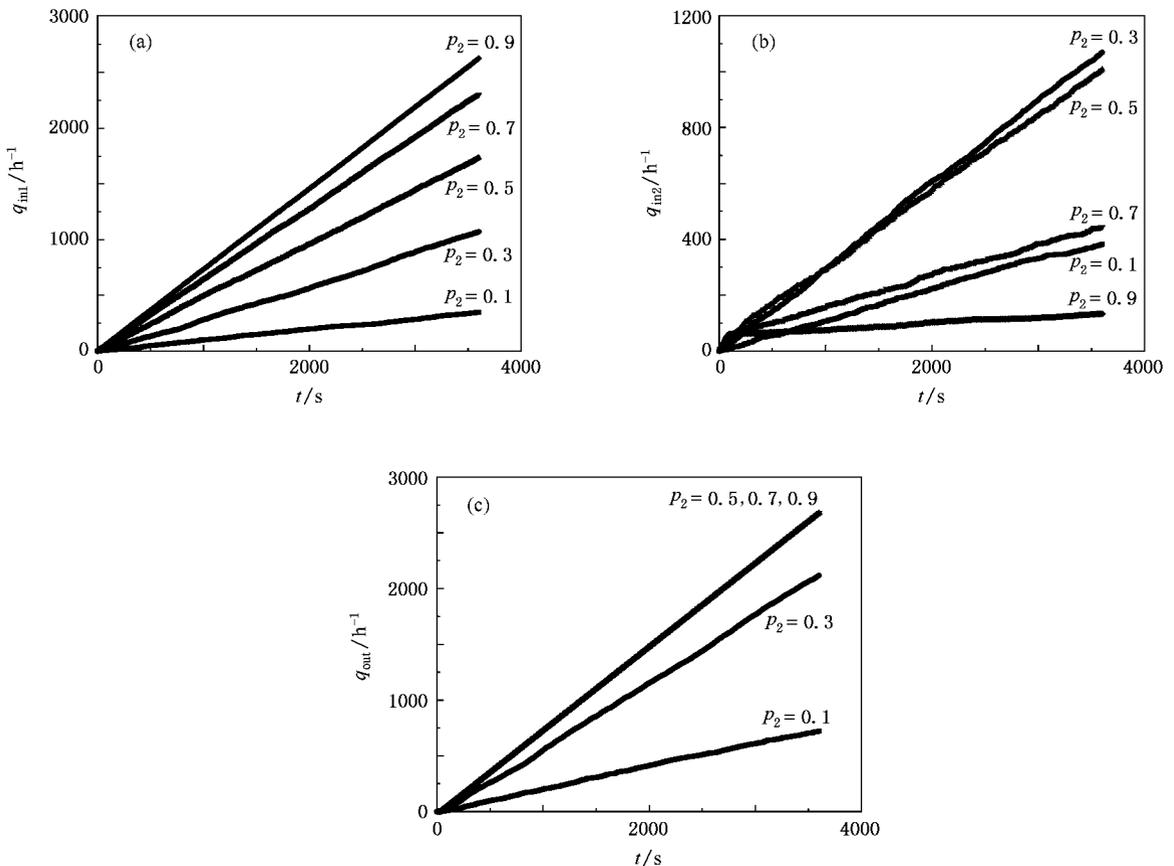


图 5 出流流量 q_{out} 和入流流量 q_{in} 随时间 t 的变化 (a) 上匝道入流流量 q_{in1} , (b) 主干道入流流量 q_{in2} , (c) 出流流量 q_{out}

数值模拟中我们采用开放性边界条件,假设主干道和上匝道的入流条件相同,即一辆速度为 v_{max} 的车以概率 p_2 进入元胞 $\{\max(\text{round}(\min(v_{max}, x_L)), 1), 1)\}$,其中 x_L 为车流中最后一辆车的位置, $\text{rand}(1)$ 是为了保证来流的不均匀性.主干道的出流条件为自由出流,即车流的头车到达主干道尾端的最末格子后将驶出系统,紧邻的下一辆车成为新的头车.

我们以通过上匝道和主干道入口断面的车辆数来表示入流流量,分别标记为 q_{in1} 和 q_{in2} ,通过主干道出口断面的车辆数标记为出流流量 q_{out} .分别选取 $v_{max} = 2, 3, 4$,可以得到 q_{in1} , q_{in2} 和 q_{out} 随入流概率 p_2 (p_2 分别取 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9) 的变化情况.由于 v_{max} 取值不同时各条曲线的性质基本相似,所以选取 $v_{max} = 3$ 时的流量曲线(图 5).由图 5 可见,随着 p_2 的增大,上匝道的入流流量呈不断增大的趋势.主干道车流在两个车道上的来流车辆不太多时 ($p_2 = 0.1, 0.3$),入流流量也会不断加大.随着来流

车辆数增多,由于越来越多的上匝道车辆变换车道后并入,使得主干道上游的车流行驶比较困难,入流流量持续下滑,当 $p_2 = 0.9$ 时,主干道上的入流流量降至不足 200/h,几乎呈堵塞状态.从出流流量看,当主干道和上匝道的来流车辆数不多时,出流流量会随着 p_2 的增大呈增长趋势,但当 $p_2 = 0.5, 0.7, 0.9$ 时,出流流量却完全相同,表明主干道出口断面处已经达到饱和状态,增加来流车辆数不会对通行能力产生任何影响.由此可见,上匝道来流车辆的频繁换道对高架路主干道交通会造成很大影响,尤其在主干道和上匝道的来流车辆较多时,可能会导致主干道交通严重不畅.针对这种状况,提出在上匝道与主干道的合流处实施交替通行控制措施是很有必要的.

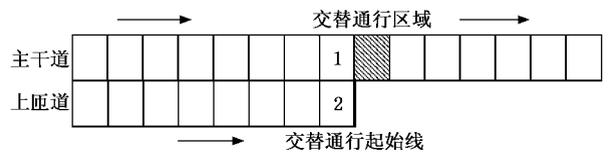


图 6 实施交替通行控制时的高架路段简化图

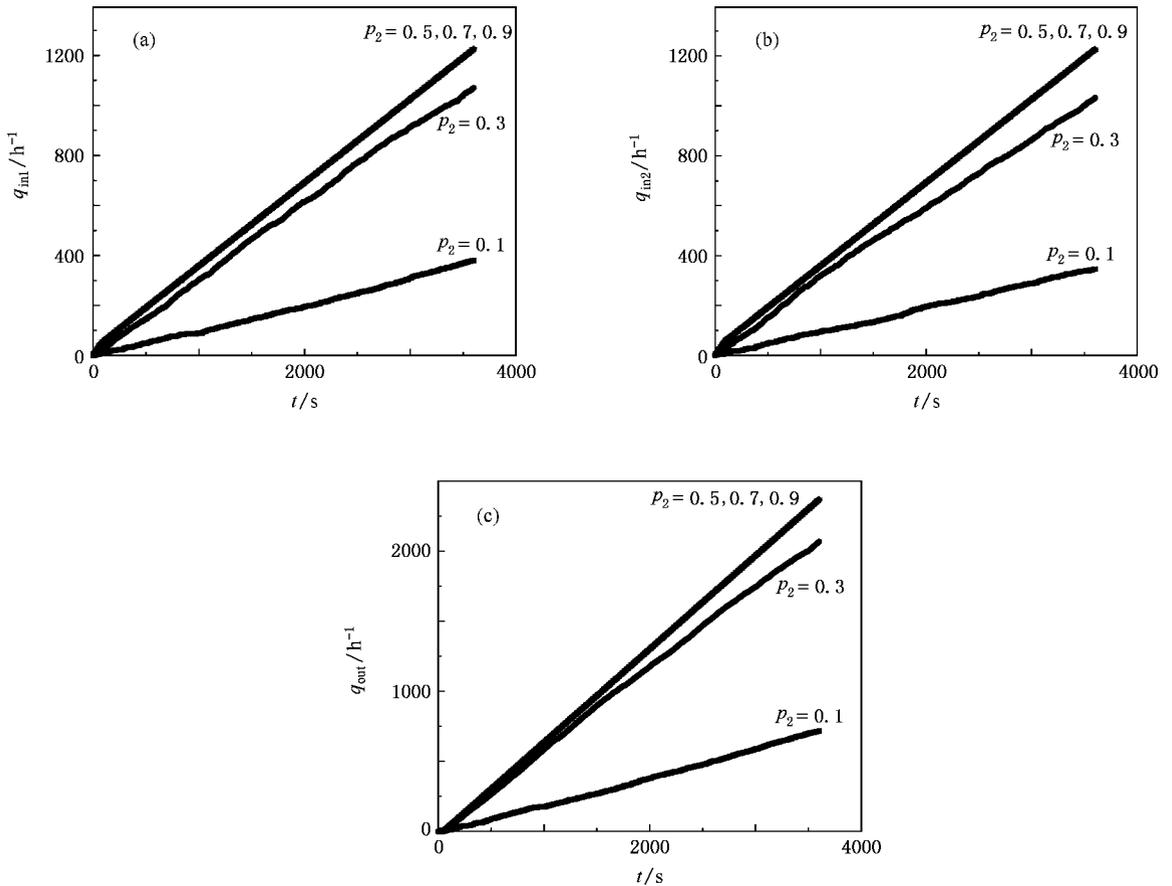


图 7 实施交替通行控制后,出流流量 q_{out} 和入流流量 q_{in} 随时间 t 的变化 (a)上匝道入流流量 q_{in1} (b)主干道入流流量 q_{in2} , (c)出流流量 q_{out}

3.3. 实施交替通行控制后的交通流状况

交替通行控制的具体实施办法以上已经作了详细阐述. 为了对实行该措施后的交通流状况进行数值模拟, 我们将图 1 中的示意图转化为图 6 所示的考察路段. 主干道长度为 100 个格子, 上匝道占据 50

个格子, 每个格子长度为 5 m. 图中阴影部分的格子对应交替通行区域. 根据“先到先行、交替通行”的控制策略, 可以将主干道和上匝道来流车辆的交通状态作如下描述: 主干道和上匝道的来流, 具有相同的最大速度 v_{\max} , 均以确定性 FI 模型规则更新车辆位置. 1 和 2 是两个关键格子, 两个车道先到达格子 1

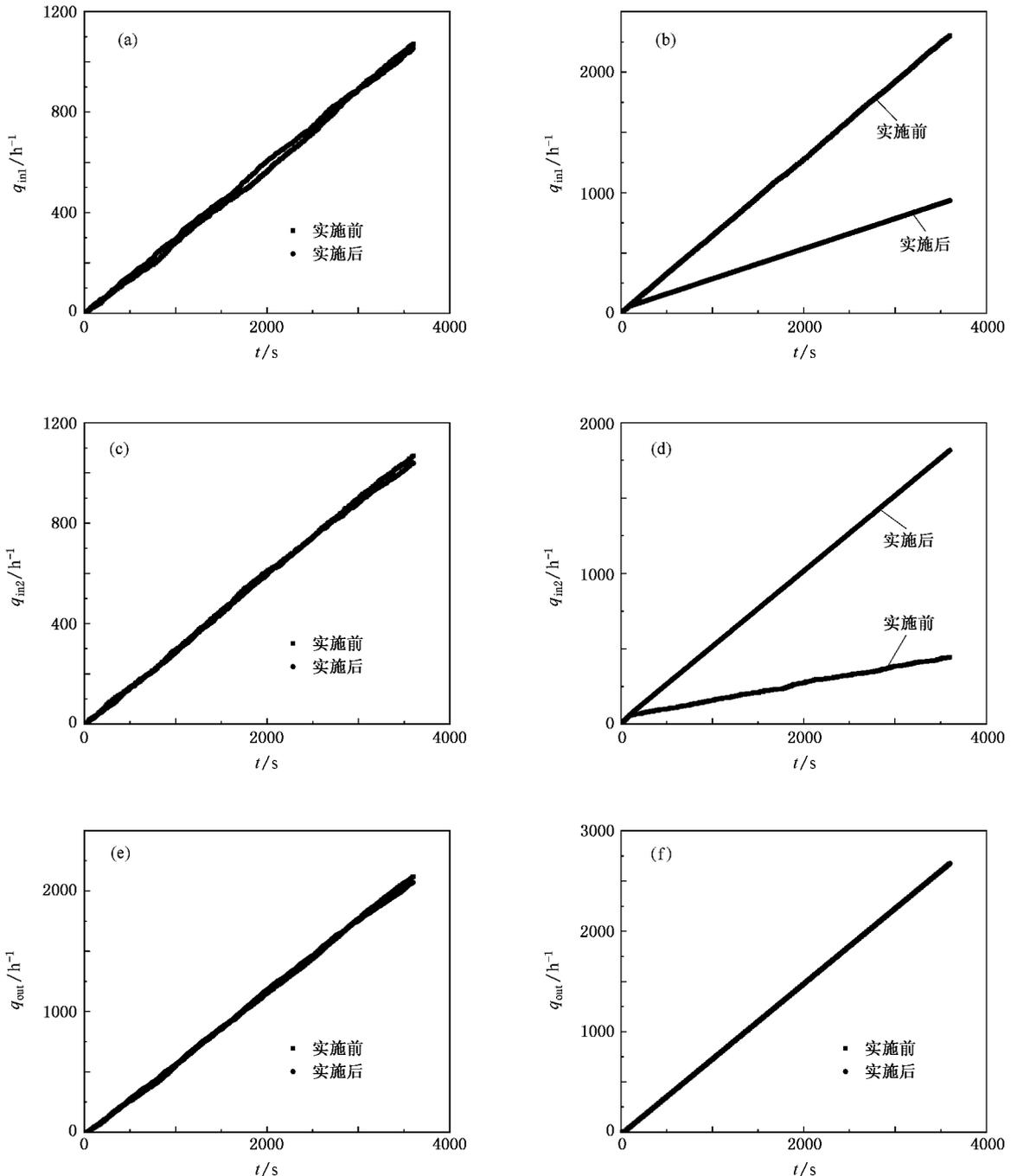


图 8 实施交替通行控制前后出流流量 q_{out} 和入流流量 q_{in} 随时间 t 的变化 (a) $p_2 = 0.3$ 时上匝道入流流量 q_{in1} (b) $p_2 = 0.7$ 时上匝道入流流量 q_{in1} (c) $p_2 = 0.3$ 时主干道入流流量 q_{in2} (d) $p_2 = 0.7$ 时主干道入流流量 q_{in2} (e) $p_2 = 0.3$ 时出流流量 q_{out} (f) $p_2 = 0.7$ 时出流流量 q_{out}

(或者格子 2)位置的车辆优先通过交替通行起始线进入交替通行区域;如果两个格子同时被两个车道的来流车辆占据,那么主干道的车辆(即占据格子 1 的车辆)优先进入交替通行区域,上匝道占据格子 2 的车辆随后通过.在通过交替通行区域后的路段上,车辆仍然以确定性 FI 模型规则更新位置.数值模拟中仍采用开放性边界条件,入流条件和出流条件都与实施交替通行控制前的情况相同. p_2 表示入流概率, q_{in1} 、 q_{in2} 和 q_{out} 的意义同前.

图 7 表示实施了交替通行控制, p_2 取不同数值时,出流流量和入流流量随时间的变化情况.不失一般性,我们选取 $v_{max} = 2$.由图 7 可见,实施交替通行控制后,上匝道和主干道的入流流量随着入流概率 p_2 的增大而增大,当 $p_2 \geq 0.5$ 时,两个车道的入流趋向稳定,不再随着入流概率的变化而发生变化.与实行交替通行控制前相比,主干道的入流流量大大增加,说明高架路上的交通状况得到很大改善.同时还发现,主干道和上匝道的入流流量几乎完全相等,说明交替通行控制兼顾到两股平行的来流,体现了公平和平等,实现了 1:1 交替行驶的目的.

为了直接比较实施交替通行控制前后的效果,我们得到了入流流量 q_{in1} 、 q_{in2} 和出流流量 q_{out} 随时间的变化,如图 8 所示.由于 v_{max} 取值不同时各条曲线的性质基本相似,所以选取 $v_{max} = 3$.由图 8 可见,当 p_2 分别取 0.3 和 0.7 时,出流流量和入流流量的变化情况完全不同.当 $p_2 = 0.3$ 时,来流车辆数不多,加速车道上的车辆可以非常顺利地换道至主干道,实施交替通行控制对主干道和上匝道的交通影响不明显,所以在实施前后出入流流量数值基本没有变化.当 $p_2 = 0.7$ 时,由于来流车辆数增多,上匝道合流处两股平行的来流争先恐后地合并,此时实施交替通行控制,使得主干道和上匝道两股车流运行有条不紊,消除了由于上匝道车辆强行换道造成的主干道交通的拥塞,使高架路上的入流流量大大

增加,而上匝道车辆由于遵守依次有序通行的规则,且其优先级低于主干道,所以在实施交替通行控制后入流流量有所下降.因此,当高架路主干道和上匝道的来流车辆较多时,实施交替通行控制进而改善高架道路交通情况的效果非常显著.反之,当主干道和上匝道的来流较为稀疏时,实施交替通行控制对高架道路的交通状况几乎没有影响.我们对实行交替通行控制的上匝道合流处进行实际观测后发现,当交通流处于或近似于畅行状态时,这一措施的确不起作用.

4. 结 论

在上匝道与高架路主干道的合流处,上匝道车辆需要由加速车道换道至高架道路,必然会造成高架路车流状态的不稳定,容易引起上游路段的拥堵,并且可能导致合流处交通事故的发生.如果在上述合流处实行交替通行控制,情况可以得到很大改善:交通流量增加、通行能力增强.更重要的是,所施行的行车规则保证了良好的交通秩序,避免了交通事故的发生.

为了研究实施交替通行控制前后的交通流状况,我们利用确定性的 FI 元胞自动机模型对上匝道合流处进行了数值模拟.结果表明:当高架路主干道和上匝道的来流车辆较多,即交通处于比较拥挤的状态时,实施交替通行控制可以大大改善高架道路交通,但是当交通比较畅通时,实施交替通行控制前后交通状况基本不发生变化.

本文仅对高架路上匝道与主干道合流处的情况进行了数值模拟与分析,我们可以将交替通行控制策略扩展到隧道或者地面道路的部分交叉路口,只要符合“两条车道的车流合并到一条车道”的道路条件,当车流处于拥堵状态时均可以实施交替通行控制,甚至可以考虑在冲突严重的交织区加以实施.

- [1] Qin Y, Yan K F 2001 *Comp. Commun.* **19** 6 (in Chinese) [覃煜、晏克非 2001 交通与计算机 **19** 6]
- [2] Li W Q, Wang W, Li T Z, Li D M 2002 *J. Southeast Univ. (Natur. Sci. Ed.)* **32** 252 (in Chinese) [李文权、王 炜、李铁柱、李冬梅 2002 东南大学学报(自然科学版) **32** 252]
- [3] Jiang R, Wu Q S, Wang B H 2002 *Phys. Rev. E* **66** 036104
- [4] Lee H Y, Lee H W, Kim D 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1130

- [5] Lee H Y, Lee H W, Kim D 1999 *Phys. Rev. E* **59** 5101
- [6] Helbing D, Treiber M 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 3042
- [7] Helbing D, Hennecke A, Treiber M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4360
- [8] Diedrich G, Santen L, Schadschneider A, Zittartz J 2000 *Int. J. Mod. Phys. C* **11** 335
- [9] Campari E G, Levi G 2000 *Eur. Phys. J. B* **17** 159

- [10] Berg P , Woods A 2001 *Phys. Rev. E* **64** 035602
- [11] Kerner B S 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046138
- [12] Kerner B S 2002 *Math. Comp. Mod.* **35** 481
- [13] Lei L , Dong L Y , Song T , Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese)[雷 丽、董力耘、宋 涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711]
- [14] Li K P , Gao Z Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 930
- [15] Dong L Y , Xue Y , Dai S Q 2002 *Appl. Math. Mech.* **23** 363
- [16] 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]
- [17] 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]
- [18] 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]
- [19] 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]
- [20] Chen Y H , Xue Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4145 (in Chinese) [陈燕红、薛 郁 2004 物理学报 **53** 4145]
- [21] Ge H X , Zhu H B , Dai S Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4621 (in Chinese)[葛红霞、祝会兵、戴世强 2005 物理学报 **54** 4621]
- [22] Hua W , Liu J 2006 *Chin. Phys.* **15** 687
- [23] Chen R X , Bai K Z , Liu M R 2006 *Chin. Phys.* **15** 1471
- [24] Fukui M , Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Jap.* **65** 1868

Study of gear-alternating control regulation in the interfluent location of on-ramps with cellular automaton model^{*}

Lei Li¹⁾ Dong Li-Yun²⁾ Ge Hong-Xia³⁾

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)*

³ *College of Science , Ningbo University , Ningbo 315211 , China)*

(Received 23 October 2006 ; revised manuscript received 17 May 2007)

Abstract

The gear-alternating control regulation was first actualized at the interfluent location of on-ramps in Shanghai elevated roads , which was theoretically studied in this paper. Different traffic flow models were established for the cases with and without the alternate controlling regulation based on the Fukui-Ishibashi cellular automaton traffic model. With the models , the traffic behavior at the interfluent location of on-ramp was investigated and some results were obtained. When there are many inflowing vehicles on the elevated road and ramp , the traffic situation on the elevated road with the controlling regulation is much better than that without it ; when there are less inflowing vehicles , the elevated road situation on the whole remains the same in the two cases.

Keywords : cellular automaton model , interfluent location of on-ramps , gear-alternating control , numerical simulation

PACC : 0550 , 0520