

考虑自适应巡航车辆影响的上匝道系统混合交通流模型

华雪东 王炜 王昊

A hybrid traffic flow model with considering the influence of adaptive cruise control vehicles and on-ramps

Hua Xue-Dong Wang Wei Wang Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 084503 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.084503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑自适应巡航车辆影响的上匝道系统混合交通流模型

[A hybrid traffic flow model with considering the influence of adaptive cruise control vehicles and on-ramps](#)

物理学报.2016, 65(8): 084503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084503>

雨天高速公路车辆换道模型研究

[Study of highway lane-changing model under rain weather](#)

物理学报.2016, 65(6): 064501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064501>

受碾区域内颗粒轴向流动特性的离散元模拟

[Granular axial flow characteristics in a grinding area studied by discrete element method](#)

物理学报.2015, 64(23): 234502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234502>

驾驶员预估效应下车流能耗演化机理研究

[Analysis of evolution mechanism of traffic energy dissipation by considering driver's forecast effect](#)

物理学报.2015, 64(15): 154503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154503>

部分道路关闭引起的交通激波特性的研究

[Study of the shock wave induced by closing partial road in traffic flow](#)

物理学报.2015, 64(11): 114502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114502>

考虑自适应巡航车辆影响的上匝道系统 混合交通流模型*

华雪东¹⁾²⁾ 王炜^{1)2)†} 王昊¹⁾²⁾

1)(东南大学交通学院, 江苏省城市智能交通重点实验室, 南京 210096)

2)(现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 南京 210096)

(2015年10月27日收到; 2016年1月10日收到修改稿)

在考虑自适应巡航(adaptive cruise control, ACC)车辆的交通流模型的基础上, 建立了考虑ACC车辆影响的上匝道系统混合交通流模型, 研究ACC车辆引入对上匝道交通系统交通流的影响. 为了描述ACC车辆和手动驾驶车辆在交通流运行中的差异, 分别构建了基于常车头时距原则的ACC车辆跟驰子模型和手动驾驶车辆MCD元胞自动机子模型; 基于上匝道车辆合流驶入主线的需求, 建立了换道子模型, 引入了表征驾驶员换道心理的参数 λ . 通过对混合交通流模型进行数值模拟发现, ACC车辆的混入可以有效改善上匝道系统交通流的运行, 降低合流等事件对于交通流运行的影响, 抑制交通拥堵的时空范围及拥堵强度, 提高交通流的平均速度和流量. 此外在混合交通流模型中, ACC车辆期望车头时距 H_d 的减小与换道心理参数 λ 的增大均可以提高混合交通流运行的速度和流量, 而合流区长度 l_w 对混合交通流影响则因上匝道车辆驶入概率的不同而存在差异.

关键词: 自适应巡航车辆, 混合交通流模型, 跟驰模型, 元胞自动机模型

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.65.084503

1 引言

自20世纪初叶开始, 欧美等西方发达国家在享受机动化交通大发展带来好处的同时, 包括交通拥堵、交通安全事故频发等在内的交通问题又逐渐困扰着城市的管理者^[1]. 一方面, 通过多年的探索, 学者们已经认识到一味通过新建道路等交通设施并不能很好地缓解交通问题. 另一方面, 作为可以多角度揭示交通系统运行状态及其演化的重要工具, 交通流理论有助于学者们掌握交通系统的基本规律, 近年来相关方面的研究则吸引了很多关注. 用于描述交通流的模型可以分为^[2]: 宏观的连续流模型^[3-16], 介观的气体动力学模型^[17-21]以及微观的跟驰模型、元胞自动机模型^[22-35].

自适应巡航技术(adaptive cruise control, ACC)是一种驾驶辅助系统, 是实现自动驾驶车辆(automated vehicle)的第一步. ACC技术可以实时地采集车辆与前车间的距离和速度差, 并基于内置的控制逻辑修改或保持车辆的运行状态. 装配ACC后, 车辆(称为ACC车辆)便可以无时差地改变其运行的状态, 这与驾驶员手动驾驶时需要一定的反应时间来改变车辆状态间存在很大的差异. 此外, ACC技术对于车辆运行的控制非常精确, 不会出现手动驾驶时速度上下波动的情况. 在引入ACC车辆后, 交通流的物理状态必然会受到影响并相应地发生改变. 关于ACC技术引入后, 其对交通流运行的影响以及交通流所呈现出的不同特征亟待理论揭示.

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB725402)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 51338003)、国家自然科学基金(批准号: 51478113)和东南大学优秀博士学位论文基金(批准号: YBJJ1345)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangwei@seu.edu.cn

实际上,国内外已经有不少学者对ACC车辆引入后的交通流开展了研究. 目前已有的研究重点关注了ACC的控制策略^[36-38]、安全性^[39,40]、交通系统稳定性^[41-43]、通行能力的变化^[44]、相变^[45]等方面. 其中,关于ACC车辆的交通流物理特征及状态的相关研究则主要是基于跟驰模型^[41,43,46,47]与元胞自动机模型^[48,49]而开展的. 2009年, Yuan^[45]等针对采用单一模型模拟ACC车辆存在的弊端,提出了一种跟驰模型与元胞自动机模型混合的交通流模型. 该模型可以很好地结合跟驰模型与元胞自动机模型的优点,进而模拟出ACC车辆存在下的交通流的运行.

然而包括 Yuan 等^[45]在内,以往的研究并没有涉及ACC车辆的换道问题. 与跟车状态下的高度自动化不同,ACC车辆在换道时仍需要通过驾驶员进行手动操作. 这种“自动跟车-手动换道-自动跟车”的操作必将与全手动或者全自动驾驶下的交通流运行存在差异,尤其是在一些较为复杂的交通环境下,如上匝道合流区等. 在存在上匝道的交通系统中,ACC车辆和手动驾驶车辆混行对交通流运行的影响等问题,目前仍缺乏相关研究.

基于上述认识,本文在 Yuan 等^[45]提出的混合交通流模型的基础上,建立了针对上匝道系统的混合交通流模型,研究ACC车辆存在的情况下,上匝道系统的交通流运行特征. 与文献^[45]一致的是,在混合交通流模型中跟驰模型用于模拟ACC车辆的运行,而元胞自动机模型则用于模拟手动驾驶车辆. 通过考虑ACC车辆比例、流量、ACC车辆车头间距、换道条件等因素的变化,获取ACC车辆存在时的上匝道交通流运行的状态特征.

2 模型的建立

将上匝道交通系统视为两列并行的道路,其中主线的长度为 L ,上匝道的长度为 L_{OR} . 除了在上匝道尾部长度为 l_w 的合流区内,上匝道的车辆可以换道合流至主线外,在其他区域两列道路相互独立运行.

在混合交通流模型中,上匝道交通系统将被抽象化为物理空间上重叠但逻辑上并行的两个系统,即离散格点链系统(图1(a))和连续跟驰系统(图1(b)),分别用于手动驾驶车辆及ACC车辆的建模,如图1所示. 在 t 时刻主线或上匝道的任意空

间位置的状态为以下三者之一: 1) 空, 2) 被离散格点链系统上的(手动驾驶)车辆占据, 3) 被连续跟驰系统上的(ACC)车辆占据.

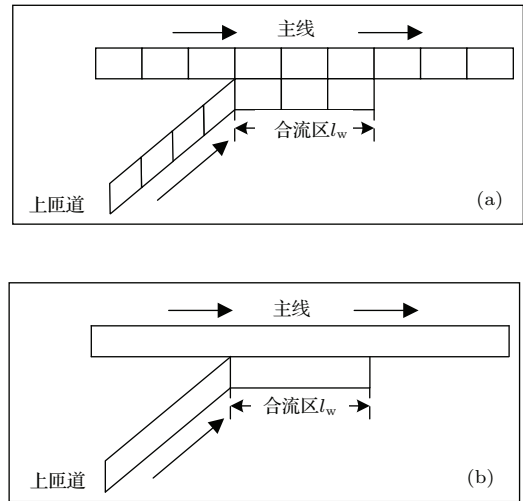


图1 存在上匝道的交通系统示意图 (a) 离散格点链系统; (b) 连续跟驰系统
Fig. 1. On-ramp traffic system: (a) Discrete cellular system; (b) continuous car-following system.

2.1 混合交通流模型

混合交通流模型的建立逻辑主要基于文献^[45],即交通流模型分为元胞自动机(CA)子模型与跟驰子模型,分别用于模拟手动驾驶车辆和ACC车辆. 其中,CA子模型选择了 Jiang 等^[50]提出的MCD元胞自动机模型,分为6个并行的步骤.

步骤1 确定随机慢化参数 $p_n(t+1)$

$$p_n(t+1) = p(v_n(t), b_{n+1}(t), t_{h,n}, t_{s,n}) \quad (1)$$

$$= \begin{cases} p_b & (b_{n+1}(t) = 1, t_{h,n} < t_{s,n}), \\ p_0 & (v_n(t) = 0, t_{st,n} \geq t_c), \\ p_d & (\text{其他}), \end{cases} \quad (2)$$

其中, $v_n(t)$ 为第 n 辆车在时刻 t 时的速度, $b_n(t)$ 为第 n 辆车在时刻 t 时的刹车灯状态,当 $b_n(t) = 1$ 时,刹车灯亮,否则刹车灯不亮; p_b, p_0 及 p_d 均为概率参数;时间 $t_{h,n} = d_n(t)/v_n(t)$, $t_{s,n} = \min(v_n(t), h)$, $d_n(t)$ 为第 n 辆车在时刻 t 时与前车的距离.

步骤2 车辆加速过程

当 $(b_{n+1}(t) = 0$ 或 $t_{h,n} \geq t_{s,n})$ 并且 $v_n(t) > 0$ 时

$$v_n(t+1) = \min(v_n(t) + 2, v_{\max}); \quad (3)$$

当 $v_n(t) = 0$ 时

$$v_n(t+1) = \min(v_n(t) + 1, v_{\max}); \quad (4)$$

否则

$$v_n(t+1) = v_n(t). \quad (5)$$

步骤3 确定性刹车过程

$$v_n(t+1) = \min(d_n^{\text{eff}}, v_n(t)), \quad (6)$$

其中, $d_n^{\text{eff}} = d_n + \max(v_{\text{anti}} - \text{gap}_{\text{safety}}, 0)$, $v_{\text{anti}} = \min(d_{n+1}, v_{n+1})$.

步骤4 随机慢化过程

当满足 $\text{rand}(\cdot) < p_n(t+1)$ 时, 交通系统会发生随机慢化:

$$v_n(t+1) = \max(v_n(t) - 1, 0), \quad (7)$$

其中, $\text{rand}(\cdot)$ 表示 0 到 1 之间的随机实数.

步骤5 更新相关参数过程

参数刹车灯状态 b_n 与 $t_{\text{st},n}$, 可由 (8) 与 (9) 式更新:

$$b_n(t+1) = \begin{cases} 0 & [v_n(t+1) > v_n(t) \text{ 或} \\ & (v_n(t+1) \geq v_c, t_{f,n} \geq t_{c1})], \\ 1 & (v_n(t+1) < v_n(t)), \\ b_n(t) & (\text{其他}), \end{cases} \quad (8)$$

$$t_{\text{st},n} = \begin{cases} t_{\text{st},n} + 1 & (v_n(t+1) = 0), \\ 0 & (\text{其他}). \end{cases} \quad (9)$$

(8) 式中的参数 $t_{f,n}$ 可由下式更新:

$$t_{f,n} = \begin{cases} t_{f,n} + 1 & (v_n(t+1) \geq 0), \\ 0 & (\text{其他}). \end{cases} \quad (10)$$

步骤6 位置更新步骤

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1). \quad (11)$$

ACC 车辆的模拟则采用跟驰模型并基于文献 [46] 提出的常车头时距原则 (constant time headway, CTH) 实时更新 ACC 车辆的运行状态. ACC 车辆状态更新的跟驰子模型如下:

$$\tau \frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} + \frac{dx_n(t)}{dt} = V \left(\Delta x_n(t), \Delta \frac{dx_n(t)}{dt} \right), \quad (12)$$

其中, $\Delta x_n(t)$ 为 ACC 车辆与前车的距离, $\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t)$. $\Delta \frac{dx_n(t)}{dt}$ 为 ACC 车辆与前车的速度差,

$$\Delta \frac{dx_n(t)}{dt} = \frac{dx_{n+1}(t)}{dt} - \frac{dx_n(t)}{dt}.$$

根据文献 [46] 的 CTH 原则, 可以推导出 ACC 车辆的最优速度函数, 如下式:

$$V \left(\Delta x_n(t), \Delta \frac{dx_n(t)}{dt} \right) = \min \left(\frac{1}{H_d} (\Delta x_n(t) - D) + \beta \Delta \frac{dx_n(t)}{dt}, v_{\max} \right), \quad (13)$$

其中, H_d 为 ACC 车辆的期望车头时距, D 为 ACC 车辆的长度.

2.2 换道模型

本文所研究的上匝道交通系统中, 换道行为仅存在于上匝道车辆到达交织区后, 从上匝道交织区换道至主线的过程. 由于上匝道为单向的道路且其终点连接主线, 因而上匝道上的车辆最终均需要换道并合流至主线行驶, 即上匝道的换道行为具有强制性. 本研究中, 换道模型基于 Hua 等 [1] 提出的考虑换道心理的换道模型, 即引入参数 λ ($\lambda \in (0, 1)$) 来刻画驾驶员换道汇入主线时的心理冒险程度: λ 越小则驾驶员换道时越不担心主线上后车会与本车相撞, 其驾驶心理越偏冒险; 反之 λ 越大则驾驶员换道时会更多地考虑主线上后车与本车相撞的可能性, 其驾驶心理越偏温和. 上匝道上行驶的车辆 n 需同时满足: 1) 位置必须位于合流区域内; 2) 车辆 n 与主线上前方紧邻车辆间的距离需要保证车辆 n 有足够的空间汇入主线; 3) 车辆 n 与主线上后方紧邻车辆间的距离需要保证车辆 n 汇入主线后, 后方车辆不至于撞上车辆 n . 此时车辆 n 需要强制换道至主线:

$$L_{\text{OR}} \geq x_n(t) \geq L_{\text{OR}} - l_w, \quad d_n^f(t) > 0, \\ d_n^{\text{rear}}(t) - \lambda v_{-n}^{\text{rear}}(t) > 0, \quad (14)$$

其中, $d_n^f(t)$ 为上匝道上第 n 辆车与主线前方紧邻车辆间的距离, $d_n^{\text{rear}}(t)$ 为上匝道上第 n 辆车与主线后方紧邻车辆间的距离, $v_{-n}^{\text{rear}}(t)$ 为上匝道上第 n 辆车在主线后方紧邻车辆的速度, $\lambda v_{-n}^{\text{rear}}(t)$ 为驾驶员对换道后后方紧邻车辆车速的估计.

2.3 边界条件及模型更新

混合交通流模型采用了开放性边界条件, 假定主线和上匝道的车辆分别以 P_{GP} , P_{OR} 的概率驶入交通系统, 其初始的驶入速度为 v_{max} . 对于主线上的车辆而言, 当其行驶到主线下游的边界时, 将立刻将其移除交通系统. 而对于行驶在上匝道上的车辆, 当其行驶到交织区范围内时, 可以通过上述 2.2 节中的换道条件判断: 1) 若满足则立刻换道至主线; 否则, 2) 若一直没有换道机会而行驶到达了上匝道交织区下游的边界时, 该车辆并不会被系统移除, 而是等待机会换道至主线.

由于存在跟驰和元胞自动机两种不同模型, 在进行交通流状态更新时, 两者存在一定的差异. ACC 车辆实时采集前车的状态并改变自身运行状态的特性决定了在进行状态更新时, 其更新的频率要求更高. 本文假定每个时间步长为 1 s, 在一个时间步长内, CA 模型更新 1 次而跟驰模型更新 10 次, 即 ACC 车辆每 0.1 s 就会采集交通流运行状态并更新自身的速度. 由于存在更新频率上的差异, 在对 ACC 车辆从 t 到 $t+1$ 时间段进行交通状态更新时, 需要注意: 1) 若 ACC 车辆跟随的是手动驾驶车辆, 则假设手动驾驶车辆的速度在 t 至 $t+1$ 时间范围内保持不变, 而其实时位置则可以通过线性插值得到; 2) 为了保证 ACC 车辆后可能跟随的手动驾驶车辆的状态可以更新, 需要同样基于 (8) 式给出 ACC 车辆的刹车灯状态 b_n .

此外, 关于上述交通流混合模型需要特别说明的是, 当交通流的组成全部为手动驾驶汽车, 即 ACC 车辆的混入比例 $P_P = 0$ 时, 上述交通流混合模型则退化为 CA 模型; 而当交通流的组成全部为 ACC 车辆时, 交通流混合模型则演变成基于 CTH 原则的跟驰模型.

3 数值模拟与结果讨论

在数值模拟时, 取定道路长度为 10 km, 即 $L = 10000$ m, 每辆标准汽车的长度为 $D = 5$ m. 为方便元胞自动机模型和跟驰子模型间物理量 (如长度、速度等) 的快速换算, 设定每个元胞的长度为 1 m, 则道路被分为 10000 个格点, 一辆手动驾驶车辆占用 5 个元胞. 设定全部车辆的最大速度为 $v_{max} = 30$ m/s. CA 模型中各项参数的取值

为: $t_c = 9$ s, $t_{c1} = 30$ s, $v_c = 18$ Cell/s, $p_d = 0.25$, $p_b = 0.94$, $p = 0.5$, $h = 6$, $gap_{safety} = 7$ Cells^[50]. 而跟驰模型的参数取值则为: $\tau = 0.4$ s. 数值模拟每次迭代 20000 时间步 (s), 统计时舍去前 10000 时间步 (s), 以排除暂态的影响. 通过系统中主线车辆驶入概率 P_{GP} 、上匝道车辆驶入概率 P_{OR} , ACC 车辆混入比例 P_P , 交织区长度 l_w , ACC 车辆选择车头时距 H_d 以及换道心理参数 λ 的不同取值模拟不同情况下引入 ACC 车辆的混合交通流在上匝道路段的运行.

3.1 ACC 车辆对交通系统的影响分析

图 2 所示为混合交通流模型在不同 ACC 车辆混入率 p_p 下, 上匝道合流区 (100 m, 图 2 左侧 1/3 部分) 及其上游影响区域 (200 m, 图 2 右侧 2/3 部分) 的时空斑图. 图 2 中, 横轴方向表示的是位置, 纵轴方向表示的是时间. 可以看出, ACC 车辆的混入可以有效地改善上匝道交通系统, 特别是合流区域交通流的运行状况: 对比不同车辆驶入概率下的时空斑图后发现, 随着 P_P 的增大, 无论是主线还是上匝道区域内, 交通流的运行均越来越趋于稳定. 当 P_{OR} 较大时 (图 2 (a1)—2 (a4)、图 2 (b1)—2 (b4)), 由于有较多的车辆从上匝道换道至主线, 导致了主线在合流区域内出现明显且持续的局部拥堵情况; 随着 ACC 车辆的增加, 该种由于上匝道车辆汇入导致的拥堵开始逐渐消散、拥堵得到范围也逐渐缩小. 而在上匝道合流区域, 随着 ACC 车辆的增加, 交通流的运行状态也从局部的拥堵退化为拥堵消失、局部缓行的状态. 当 $P_{OR} = 0.2$ 时 (图 2 (c1)—2 (c4)、图 2 (d1)—2 (d4)), 上匝道的车流相对较小, 交通流的运行也较为稳定, 仅在上匝道的尽头聚集了少量的等候换道车辆. 此时 ACC 车辆的增加同样缓解了交通流的运行不稳定性. 而在主线, 由于其初始流量较大, 导致即使少量的车流从上匝道汇入也会造成主线拥堵. 此后随着 ACC 车辆的增加, 主线交通流的运行同样趋于稳定, 局部的拥堵开始逐渐消散.

此外, 当 ACC 车辆较少且匝道汇入需求较大时, 由于上匝道车辆合流的影响, 主线上的拥堵范围已经由合流区向其上游蔓延 (图 2 (a1), 图 2 (a2)); 随着 ACC 车辆的增加, 主线拥堵的范围逐步缩小, 合流区上游的拥堵基本消散, 交通拥堵开始则只影响合流区本身 (图 2 (a3), 图 2 (a4)).

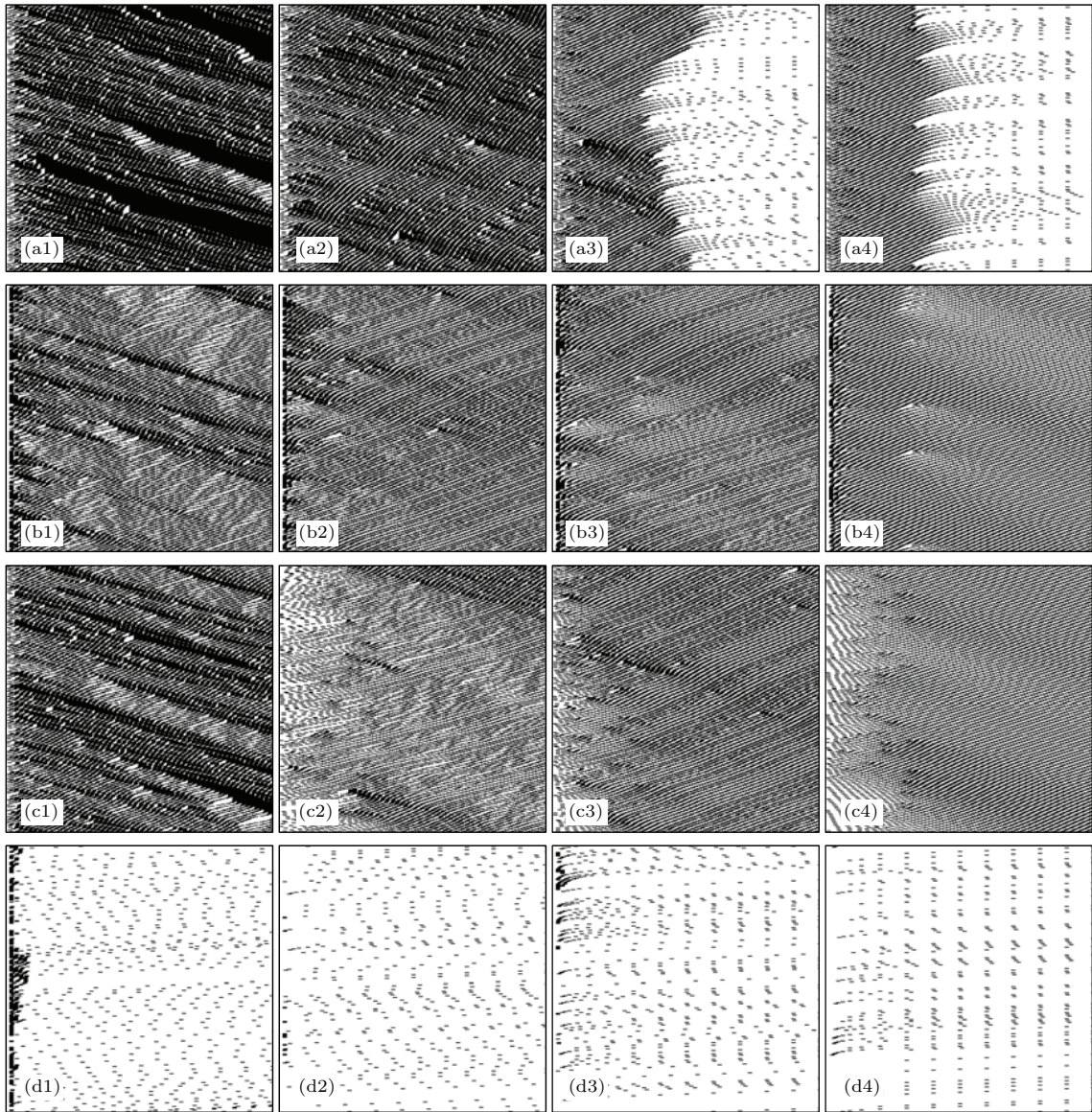


图2 合流影响区时空斑图 ($l_w = 100, H_d = 1, \lambda = 0$) (a) 主线 ($P_{GP} = 0.2, P_{OR} = 0.6$); (b) 上匝道 ($P_{GP} = 0.2, P_{OR} = 0.6$); (c) 主线 ($P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2$); (d) 上匝道 ($P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2$); (a1)—(d1) $p_p = 0$; (a2)—(d2) $p_p = 0.33$; (a3)—(d3) $p_p = 0.67$; (a4)—(d4) $p_p = 1$

Fig. 2. Temporal-spatial pattern at merge related area ($l_w = 100, H_d = 1, \lambda = 0$): (a) Main road ($P_{GP} = 0.2, P_{OR} = 0.6$); (b) on ramp ($P_{GP} = 0.2, P_{OR} = 0.6$); (c) main road ($P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2$); (d) on ramp ($P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2$); (a1)—(d1) $p_p = 0$; (a2)—(d2) $p_p = 0.33$; (a3)—(d3) $p_p = 0.67$; (a4)—(d4) $p_p = 1$.

图3和图4分别为全手动驾驶车辆 ($p_p = 0$) 和全ACC车辆 ($p_p = 1$) 在不同车辆驶入概率 P_{GP} , P_{OR} 下的速度和流量热力图。从速度的角度分析, 当交通系统中不存在ACC车辆时(图3(a)和图3(c)), 随着上匝道车辆驶入概率 P_{OR} 的增大, 越来越多的车辆汇入使得主线的交通流速度骤降。上匝道车辆的平均速度则随着主线车辆驶入概率 P_{GP} 的增大而降低。而当上匝道系统中全部是ACC车辆时(图3(b)和图3(d)), 主线和上匝道交通流的运行速度和流量均有很大的提升。类似地,

图4则从流量的角度展示了不同车辆驶入概率下ACC车辆和手动驾驶车辆的表现差异: 与手动驾驶车辆相比, ACC车辆能有效地提高上匝道系统的流量。

通过图2—图4中对手动驾驶车辆和ACC车辆对交通流运行影响的分析可以发现: 1) 在相同的车辆驶入概率下, ACC车辆的引入可以有效降低合流等交通事件对于交通流运行的影响, 提高交通流的平均速度和流量, 提升交通系统对意外事件的抗干扰能力; 2) ACC车辆对交通拥堵起到抑制

作用, ACC车辆的引入可以有效降低交通拥堵发生的时间长度与空间范围; 3) 在车辆驶入概率很大

的情况下, ACC车辆的引入可以增大交通流的最小速度和流量.

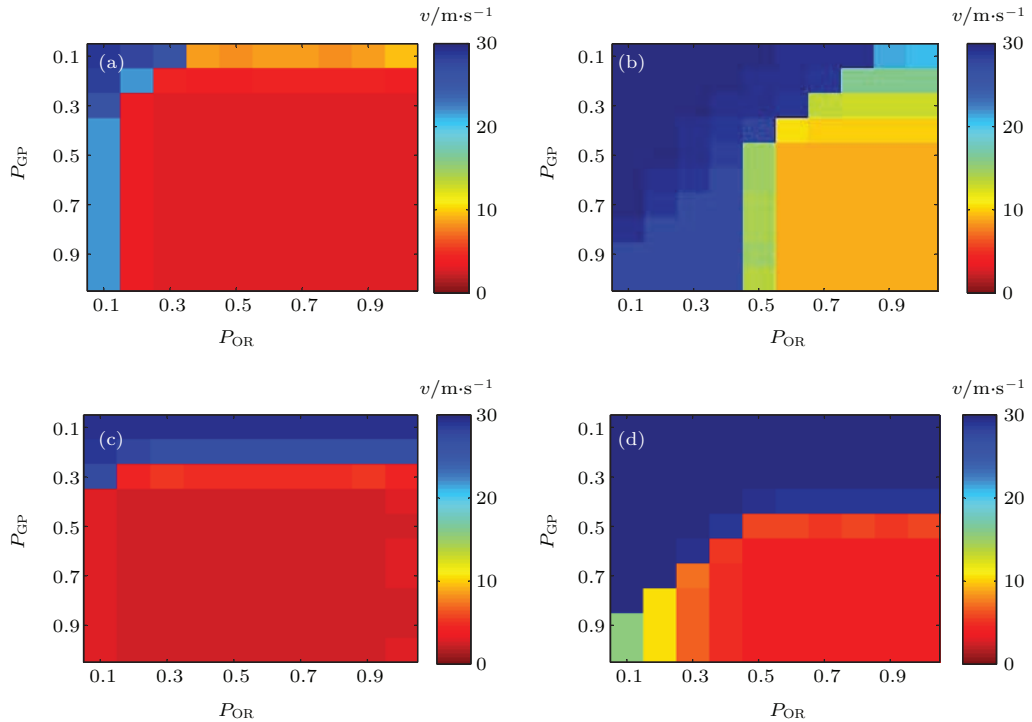


图3 速度随 P_{GP} , P_{OR} 变化的热力图 ($l_w = 100, H_d = 1, \lambda = 0$) (a) 主线 ($p_p = 0$); (b) 主线 ($p_p = 1$); (c) 上匝道 ($p_p = 0$); (d) 上匝道 ($p_p = 1$)

Fig. 3. Heat map of speed vs. P_{GP} and P_{OR} ($l_w = 100, H_d = 1, \lambda = 0$): (a) Main road ($p_p = 0$); (b) main road ($p_p = 1$); (c) on ramp ($p_p = 0$); (d) on ramp ($p_p = 1$).

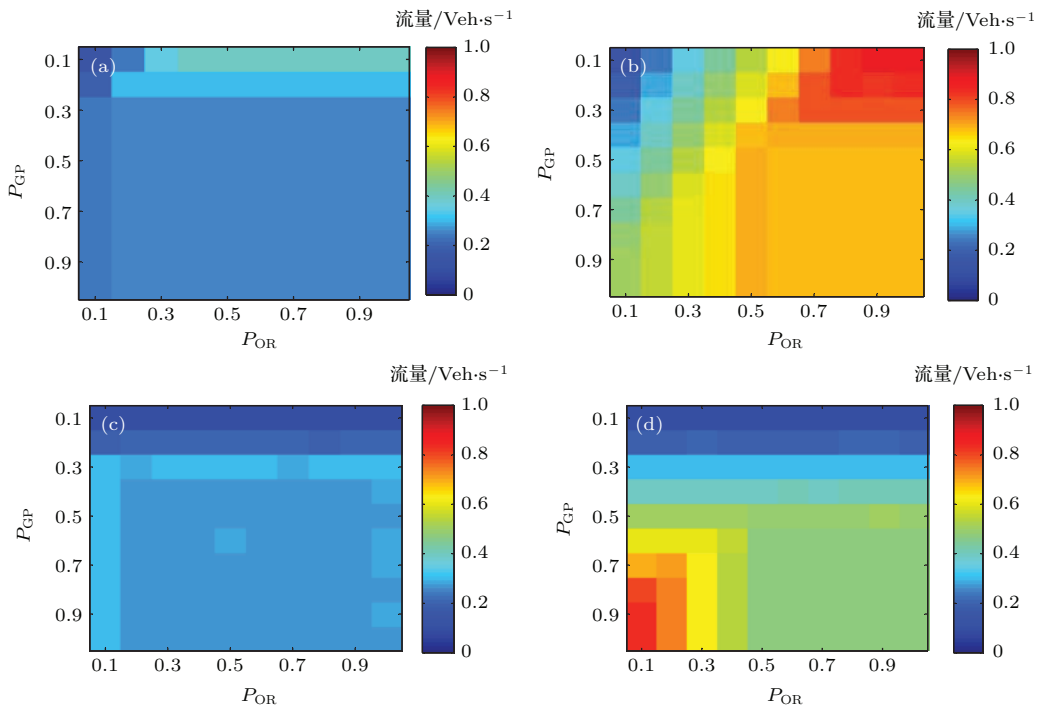


图4 流量随 P_{GP} , P_{OR} 变化的热力图 ($l_w = 100, H_d = 1, \lambda = 0$) (a) 主线 ($p_p = 0$); (b) 主线 ($p_p = 1$); (c) 上匝道 ($p_p = 0$); (d) 上匝道 ($p_p = 1$)

Fig. 4. Heat map of volume vs. P_{GP} and P_{OR} ($l_w = 100, H_d = 1, \lambda = 0$): (a) Main road ($p_p = 0$); (b) main road ($p_p = 1$); (c) on ramp ($p_p = 0$); (d) on ramp ($p_p = 1$).

3.2 合流区长度对上匝道混合交通流的影响

图5所示为ACC车辆和手动驾驶车辆混行的情况下, 当上匝道车辆驶入概率较低 ($P_{OR} = 0.2$) 和较高 ($P_{OR} = 0.6$) 时, 不同合流区长度下的主线交通流运行平均速度和流量曲线. 当上匝道车辆驶入概率较低时(图5(a)和图5(b)), 可以看出当主线车辆驶入概率较小时 ($P_{GP} < 0.4$), 合流区长度 l_w 的变化对交通流的影响并不显著. 当主线车辆驶入概率大于0.4时, 随着合流区长度 l_w 的增加, 主

线交通流的平均速度和流量则开始有一定程度的提高. 当 $l_w > 150$ m时, 这种合流区长度的变化对主线交通流的影响开始变小. 而在上匝道车辆驶入概率较大时(图5(c)和图5(d)), 合流区长度对主线交通流的影响则完全不同: 当主线车辆驶入概率大于0.2时, 合流区长度的变化对主线交通流的速度影响很小; 相反的, $P_{GP} < 0.2$ 时, 合流区长度的变化则会影响速度的变化, 且随着合流区长度的增加, 交通流的平均速度开始降低. 在上匝道车辆驶入概率较大时, 合流区长度的变化对主线交通流的流量影响则并不明显.

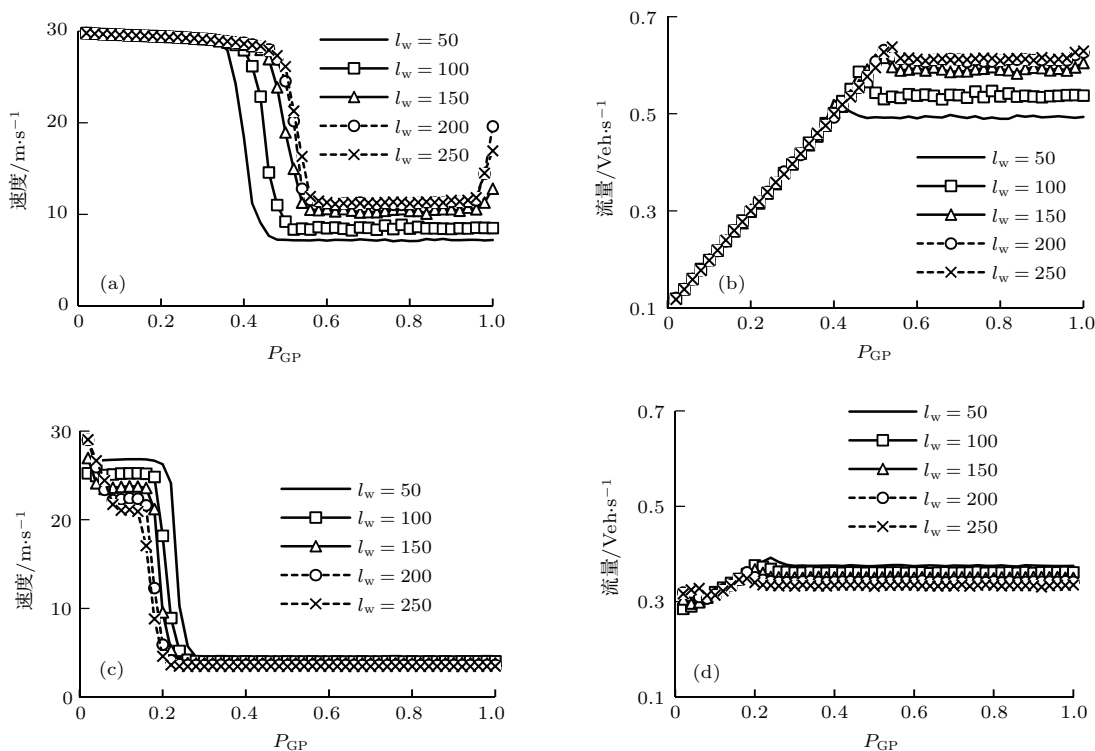


图5 合流区长度对主线交通流的影响 ($P_P = 0.5, H_d = 1, \lambda = 0$) (a) 速度 ($P_{OR} = 0.2$); (b) 流量 ($P_{OR} = 0.2$); (c) 速度 ($P_{OR} = 0.6$); (d) 流量 ($P_{OR} = 0.6$)

Fig. 5. Influence of merge area length on main road traffic flow ($P_P = 0.5, H_d = 1, \lambda = 0$): (a) Speed ($P_{OR} = 0.2$); (b) volume ($P_{OR} = 0.2$); (c) speed ($P_{OR} = 0.6$); (d) volume ($P_{OR} = 0.6$).

图6为当交通系统中全部为ACC车辆时 ($P_P = 1$), 合流区长度对交通流运行的影响. 可以清楚地看出, 除了 P_{OR} 较大时(图6(c))外, 当上匝道和主线中不存在手动驾驶车辆时, 合流区长度的变化对主线交通流的速度和流量的影响非常微小. $P_{OR} = 0.6$ 时(图6(c)), 随着合流区长度的增加, 交通流的平均速度由一定的降低, 这与图5(c)中ACC车辆和手动驾驶车辆混行情况下的规律是一致的. 此外, 对比图5与图6可知, 在任何合流区长度下, ACC车辆的增加会提高主线交通流的运

行速度和流量. 这也与前述的结论保持了一致.

通过对图5和图6的分析可以发现: 1) 在引入ACC车辆后, 在合流需求较小时, 适当地增加合流区的长度可以在一定程度上提高主线交通流的运行速度及流量; 而在合流需求较大时, 则需要通过缩短合流区长度来降低上匝道车流对主线车流的影响; 2) 当交通系统中全部为ACC车辆时, 虽然交通系统的运行会因为ACC车辆而变得稳定, 但却很难通过调整合流区长度来进一步增加交通流速度和流量.

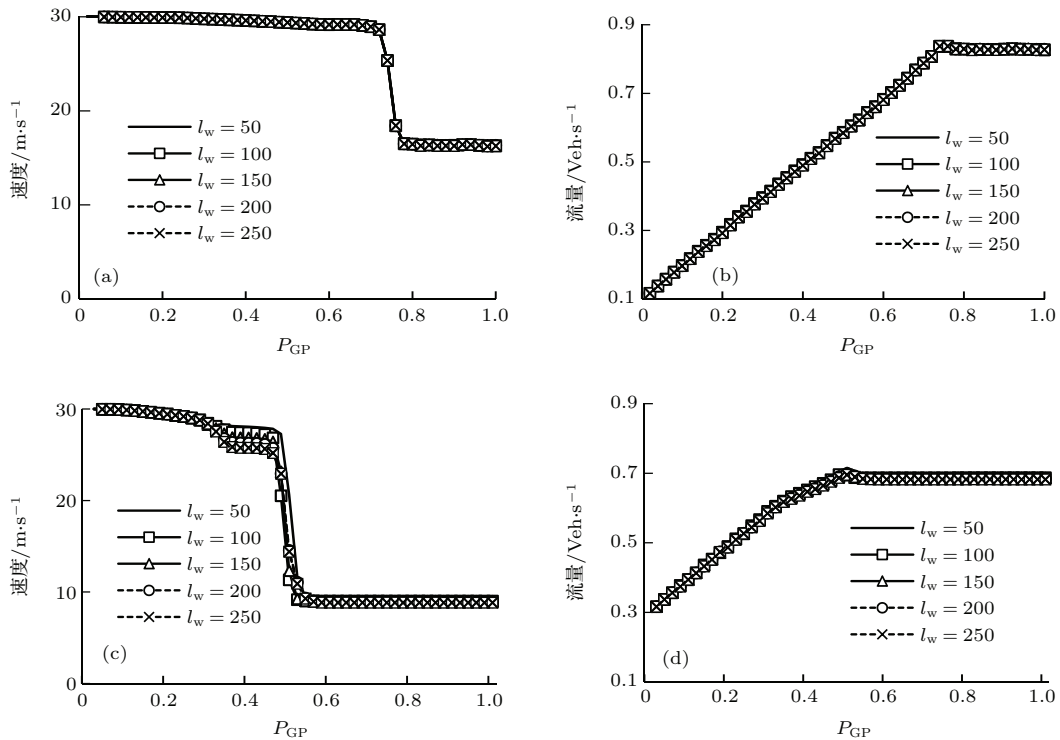


图6 合流区长度对主线交通流的影响 ($P_P = 1, H_d = 1, \lambda = 0$) (a) 速度 ($P_{OR} = 0.2$); (b) 流量 ($P_{OR} = 0.2$); (c) 速度 ($P_{OR} = 0.6$); (d) 流量 ($P_{OR} = 0.6$)

Fig. 6. Influence of merge area length on main road traffic flow ($P_P = 1, H_d = 1, \lambda = 0$): (a) Speed ($P_{OR} = 0.2$); (b) volume ($P_{OR} = 0.2$); (c) speed ($P_{OR} = 0.6$); (d) volume ($P_{OR} = 0.6$).

3.3 期望车头时距对上匝道混合交通流的影响

图7所示为当混合交通流模型退化为跟驰模型时,即交通系统中全部为ACC车辆时,ACC车辆期望车头时距的变化对主线交通流的影响.由图7易知,无论上匝道的车辆驶入概率高低与否,随着ACC车辆期望车头时距 H_d 的降低,主线交通系统的平均速度和流量均有很大程度的增加.这主要是因为 H_d 的降低,使得在跟驰状态下相邻车辆间的距离缩短,导致交通流的密度增大.根据CTH原则和(13)式,跟随车辆的期望速度也会随着 H_d 的降低而增大,此时交通系统的速度必然会随之增大,进而主线交通流的流量也会增加.此外由图7还能发现,随着主线车辆驶入概率的增大,交通流的速度会出现突然的骤降现象.此种速度的骤降会随着期望车头时距 H_d 的降低而发生推移,说明上匝道交通系统交通流会随着ACC车辆期望车头时距的降低而变得稳定.

在图7的基础上,图8更为细致地刻画了不同期望车头时距下主线合流区及其影响区域的时空斑图.由斑图可以清楚地看出,当期望车头时距较

小时,主线合流区域的交通流运行非常稳定,车间间距较大,除了在交织区的起始位置出现了局部的车辆减速缓行与排队积压现象外,其余区域的交通流并未显著受到车辆合流的影响.随着期望车头时距的增大,上匝道的车辆有更多的机会换道至主线行驶,影响主线交通流的顺畅运行,导致主线交通流减速缓行与排队积压区域的增大,交通流的密度增加.但此时,主线交通流的运行速度则受此影响而降低.

3.4 换道心理对上匝道混合交通流的影响

图9所示为在不同 λ 下、不同ACC车辆混入率的主线合流区及其影响区域的时空斑图.纵向对比来看,在任何ACC混入率下,随着 λ 的增大,主线交通流的运行越趋于稳定,交通拥堵发生的时空范围及拥堵强度都越小.即驾驶员在上匝道合流区换道时越谨慎、越多地考虑主线上后车的速度时,其最终的换道行为对主线交通流的影响越小.横向对比来看,无论驾驶员的换道心理偏激进(λ 偏小)还是温和(λ 偏大),随着ACC车辆的增多,主线交通流的运行都会趋于稳定.这与前述相关分析的结果也是一致的.

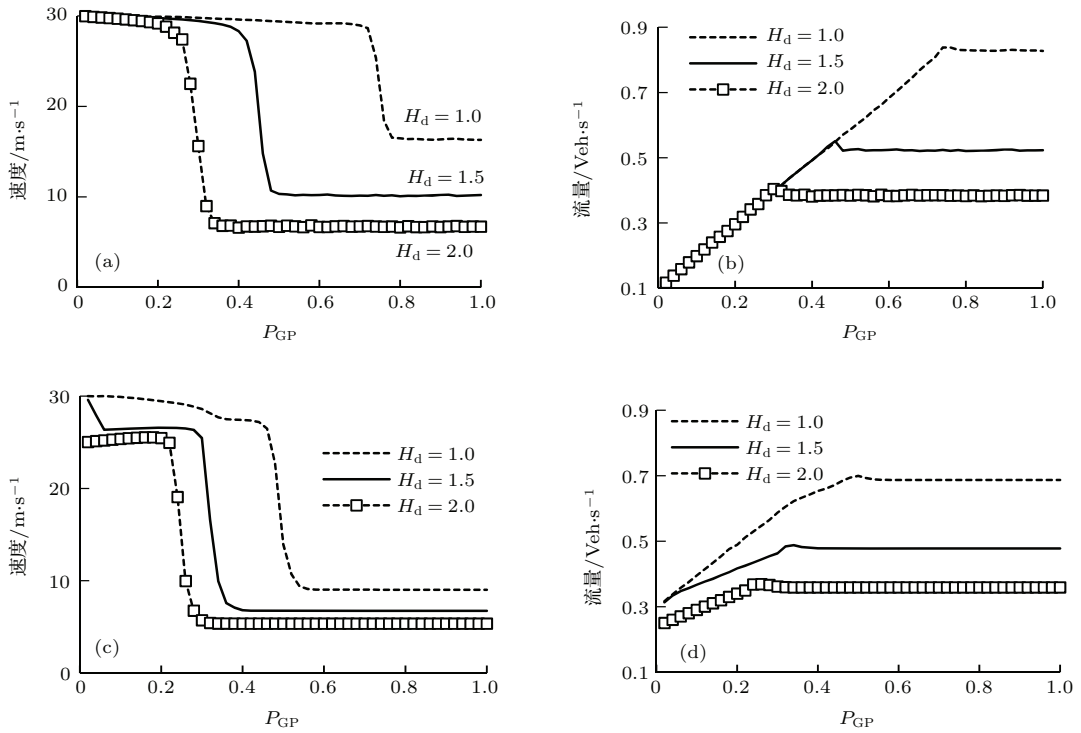


图7 ACC期望车头时距对主线交通流的影响 ($p_p = 1, l_w = 100, \lambda = 0$) (a)速度 ($P_{OR} = 0.2$); (b)流量 ($P_{OR} = 0.2$); (c)速度 ($P_{OR} = 0.6$); (d)流量 ($P_{OR} = 0.6$)

Fig. 7. Influence of desired headway of ACC vehicles on main road traffic flow ($p_p = 1, l_w = 100, \lambda = 0$): (a) Speed ($P_{OR} = 0.2$); (b) volume ($P_{OR} = 0.2$); (c) speed ($P_{OR} = 0.6$); (d) volume ($P_{OR} = 0.6$).

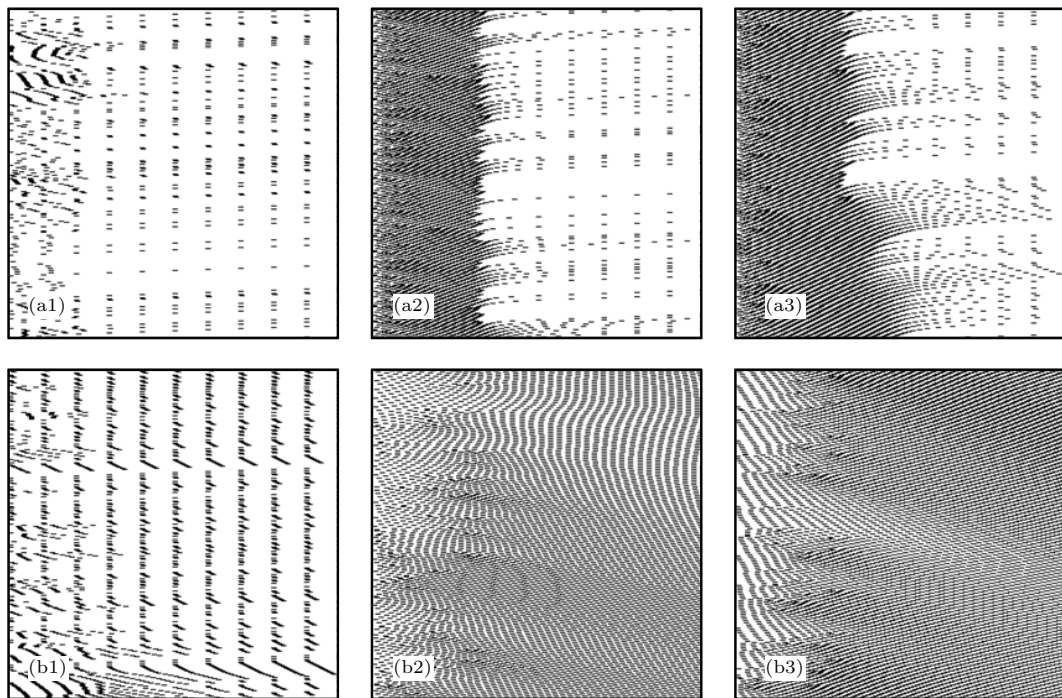


图8 不同ACC期望车头时距下主线合流影响区时空斑图 ($p_p = 1, l_w = 100, \lambda = 0$) (a) $P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2$; (b) $P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.6$; (a1), (b1) $H_d = 1$; (a2), (b2) $H_d = 1.5$; (a3), (b3) $H_d = 2$

Fig. 8. Temporal-spatial pattern of different desired headway of ACC vehicles at merge related area of main road ($p_p = 1, l_w = 100, \lambda = 0$): (a) $P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2$; (b) $P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.6$; (a1), (b1) $H_d = 1$; (a2), (b2) $H_d = 1.5$; (a3), (b3) $H_d = 2$.

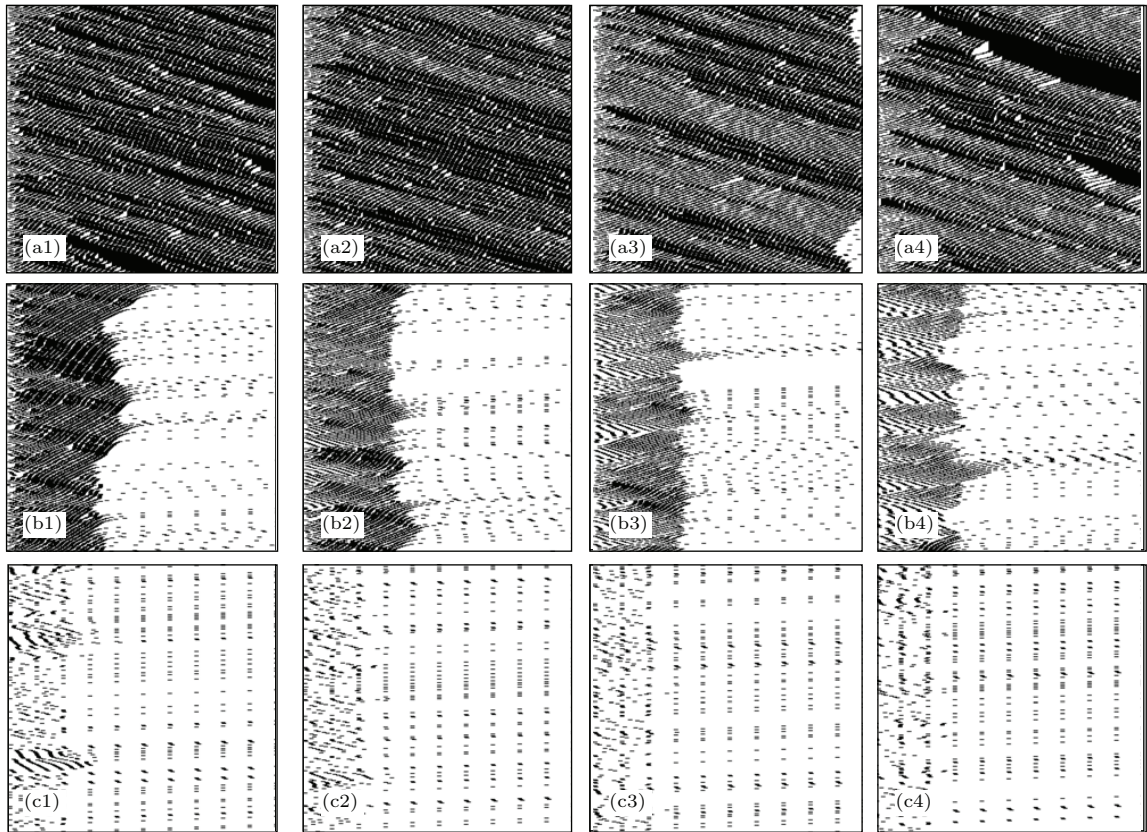


图9 不同 λ 下主线合流影响区时空斑图 ($P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2, l_w = 100, H_d = 1$) (a) $p_p = 0$; (b) $p_p = 0.5$; (c) $p_p = 1$; (a1)—(c1) $\lambda = 0$; (a2)—(c2) $\lambda = 0.33$; (a3)—(c3) $\lambda = 0.67$; (a4)—(c4) $\lambda = 1$

Fig. 9. Temporal-spatial pattern of different λ at merge related area of main road ($P_{GP} = 0.6, P_{OR} = 0.2, l_w = 100, H_d = 1$): (a) $p_p = 0$; (b) $p_p = 0.5$; (c) $p_p = 1$; (a1)—(c1) $\lambda = 0$; (a2)—(c2) $\lambda = 0.33$; (a3)—(c3) $\lambda = 0.67$; (a4)—(c4) $\lambda = 1$.

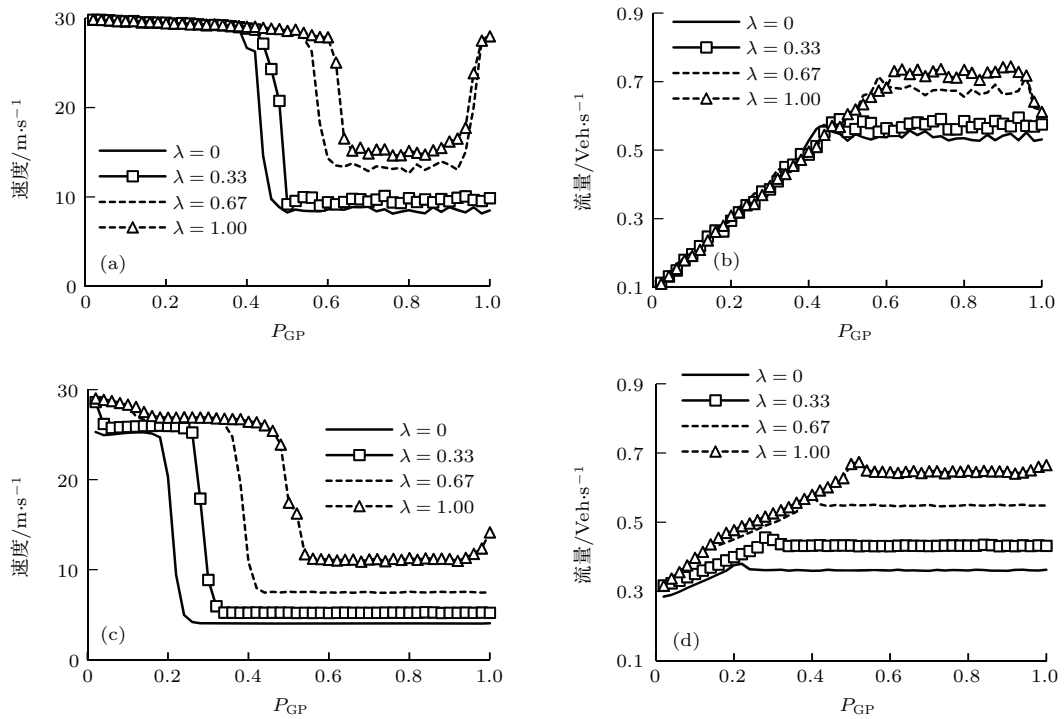


图10 换道心理参数 λ 对主线交通流的影响 ($p_p = 0.5, l_w = 100, H_d = 1$) (a)速度 ($P_{OR} = 0.2$); (b)流量 ($P_{OR} = 0.2$); (c)速度 ($P_{OR} = 0.6$); (d)流量 ($P_{OR} = 0.6$)

Fig. 10. The influence of λ on main road traffic flow ($p_p = 0.5, l_w = 100, H_d = 1$): (a) Speed ($P_{OR} = 0.2$); (b) volume ($P_{OR} = 0.2$); (c) speed ($P_{OR} = 0.6$); (d) volume ($P_{OR} = 0.6$).

图 10 为以 ACC 车辆混入率为 0.5 为例, 不同 λ 下的主线交通流的速度和流量曲线. 当上匝道的车辆驶入概率较低(图 10(a) 和图 10(b)) 时, 在 P_{GP} 较小时, λ 的变化并不会引起主线交通流的显著变化; 当 P_{GP} 大于 0.4 时, 随着 λ 的增大, 驾驶员在上匝道合流区换道时越谨慎, 交通流的速度和流量越大. 而当上匝道的车辆驶入概率较低(图 10(c) 和图 10(d)) 时, 无论 P_{GP} 大小与否, λ 的变化均会影响交通流的运行.

需要特别说明的是, 在图 10(a) 中, 当 P_{GP} 大于 0.9 且 λ 大于 0.67 时, 主线交通流的速度出现突然增大的现象(在图 10(c) 中, 也存在类似的现象). 这主要是由于一方面上匝道车辆的驶入概率较低, 当 λ 较大时, 上匝道车辆换道至主线的流量较小, 降低了其对主线的影响; 另一方面, 在主线交通流增大时, 主线车流的车头间距减小, 进一步降低了上匝道车辆换道至主线的可能性.

4 结 论

本文在 Yuan 等^[45] 提出的考虑 ACC 车辆的交通流模型的基础上, 建立了考虑 ACC 车辆影响的上匝道系统混合交通流模型, 研究 ACC 车辆引入后对上匝道交通系统交通流运行的影响. 根据 ACC 车辆和手动驾驶车辆在行驶中的差异, 分别构建了基于 CTH 原则的跟驰子模型和 MCD 元胞自动机子模型, 用于描述 ACC 车辆混入后 ACC 车辆和手动驾驶车辆的运行. 基于上匝道车辆合流驶入主线的需求, 引入了表征驾驶员换道心理的参数 λ , 并构建了上匝道合流区强制换道模型. 最后通过数值模拟, 研究不同车辆驶入概率下、不同 ACC 车辆混入率对上匝道交通系统交通流运行的影响, 探求混合交通流模型中主要参数合流区长度、ACC 车辆期望车头时距及对换道心理参数 λ 对交通流运行的影响.

本文的研究表明: 在 ACC 车辆混入后, 可以有效地改善上匝道交通系统交通流的运行情况, 降低合流等交通事件对于交通流运行的影响, 提高交通流的平均速度和流量, 提升交通系统对意外事件的抗干扰能力; ACC 车辆的增多可以抑制上匝道交通系统交通拥堵发生的时空范围及拥堵强度; 此外, 本文提出的混合交通流模型对合流区长度 l_w , ACC 车辆期望车头时距 H_d 及对换道心理参数

λ 较为敏感: H_d 的减小与 λ 的增大均可以提高混合交通流模型的速度、流量等参数, 而 l_w 对混合交通流模型的影响则因上匝道车辆驶入概率的不同而不同.

最后需要指出的是, 一方面, 本研究着重关注的 ACC 自适应巡航技术仍处在自动驾驶汽车研究的中间阶段, 未来随着 IT 技术、自动化控制技术等方面研究的深入, 必然会推动自动驾驶技术的进一步升级革新. 在这种情况下, 交通流的运行必将呈现出新的特征. 另一方面, 在 ACC 技术的实际运用过程中, 会处于对该技术安全性的考虑而对 ACC 的使用做出种种限制. 这也会导致对于 ACC 车辆交通流的理论分析与实际运行间产生差异. 因此, 在未来的研究中, 有必要在现有的混合模型中考虑上述影响.

参考文献

- [1] Hua X D, Wang W, Wang H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084502 (in Chinese) [华雪东, 王伟, 王昊 2011 物理学报 **60** 084502]
- [2] Yuan Y M 2009 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [袁耀明 2009 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [3] Lighthill M J, Whitham G B 1955 *Proc. Roy. Soc. Ser. A* **22** 317
- [4] Richards P I 1956 *Oper. Res.* **4** 42
- [5] Pipes L A 1969 *Transp. Res.* **3** 229
- [6] Payne H J 1971 *Math. Meth. Pub. Sys.* **28** 51
- [7] Kuhne R D 1984 *Proceeding 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory Delft, Netherlands, July 11–13, 1984* p21
- [8] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2002 *Transp. Res. B* **36** 405
- [9] Xue Y, Dai S Q 2003 *Phys. Rev. E* **68** 066123
- [10] Tang T Q, Caccetta L, Wu Y H, Huang H J, Yang X B 2014 *J. Adv. Transport.* **48** 304
- [11] Tang T Q, Shi W F, Yang X B, Wang Y P, Lu G Q 2013 *Physica A* **392** 6300
- [12] Peng G H, Song W, Peng Y J, Wang S H 2014 *Physica A* **398** 76
- [13] Redhu P, Gupta A K 2015 *Physica A* **421** 249
- [14] Gupta A K, Sharma S 2010 *Chin. Phys. B* **19** 110503
- [15] Gupta A K, Sharma S 2012 *Chin. Phys. B* **21** 015201
- [16] Peng G H, Cai X H, Cao B F, Liu C Q 2012 *Physica A* **391** 656
- [17] Treiber M, Henneke A, Helbing D 1999 *Phys. Rev. E* **59** 239
- [18] Herbing D, Treiber M 1998 *Granular Matter* **1** 21
- [19] Herbing D 1996 *Physica A* **233** 253
- [20] Herbing D 1996 *Phys. Rev. E* **53** 2366
- [21] Li L, Shi P F 2005 *Chin. Phys.* **14** 576
- [22] Tang T Q, He J, Yang S C, Shang H Y 2014 *Physica A* **413** 583

- [23] Zeng Y Z, Zhang N, Liu L J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 068901 (in Chinese) [曾友志, 张宁, 刘利娟 2014 物理学报 **63** 068901]
- [24] Ge H X, Meng X P, Zhu H B, Li Z P 2014 *Physica A* **408** 28
- [25] Koutsopoulos H N, Farah H 2012 *Trans. Res. B* **46** 563
- [26] Ge H X, Yu J, Lo S M 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 50502
- [27] Ge H X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 090502
- [28] Zhou T, Sun L H, Zhao M, Li H M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 090205
- [29] Punzo V, Ciuffo B, Montanino M 2012 *Transp. Res. Rec.* **2315** 11
- [30] Lakouari N, Bentaleb K, Ez-Zahraouy H, Benyoussef A 2015 *Physica A* **439** 132
- [31] Yang D, Qiu X P, Yu D, Sun R X, Pu Y 2015 *Physica A* **424** 62
- [32] Jing M, Deng W, Wang H, Ji Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244502 (in Chinese) [敬明, 邓卫, 王昊, 季彦婕 2012 物理学报 **61** 244502]
- [33] Lárraga M E, Alvarez-Icaza L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050701
- [34] Qian Y S, Shi P J, Zeng Q, Ma C X, Lin F, Sun P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 048201
- [35] Ez-Zahraouyt H, Jetto K, Benyoussef A 2006 *Chin. J. Phys.* **44** 486
- [36] Siebert F W, Oehl M, Pfister H R 2014 *Trans. Res. F* **25** 65
- [37] Zhao D B, Hu Z H, Xia Z P, Alippi C, Zhu Y H, Wang D 2014 *Neurocomputing* **125** 57
- [38] Bishop R 2005 *Intelligent Vehicle Technology and Trends* (Boston: Artech House) pp127–134
- [39] Mark V, Schleicher S, Gelau C 2011 *Accident Anal. Prev.* **43** 1134
- [40] Bato J 2011 *Ph. D. Dissertation* (Seattle: University of Washington)
- [41] Orosz G, Moehlis J, Bullo F 2010 *Phys. Rev. E* **81** 025204
- [42] Xiao L Y, Gao F 2011 *IEEE Trans. Intell. Transp.* **12** 1184
- [43] Davis L C 2012 *Phys. Lett. A* **376** 2658
- [44] Werf J V, Shladover S, Miller M, Kourjanskaia N 2002 *Transp. Res. Rec.* **1800** 78
- [45] Yuan Y M, Jiang R, Hu M B, Wu Q S, Wang R 2009 *Physica A* **388** 2483
- [46] Davis L C 2004 *Phys. Rev. E* **69** 066110
- [47] Kesting A, Treiber M, Schonhof M, Helbing D 2008 *Transp. Res. C* **16** 668
- [48] Jiang R, Hu M B, Jia B, Wang R, Wu Q S 2007 *Eur. Phys. J. B* **58** 197
- [49] Jiang R, Wu Q S 2006 *Phys. Lett. A* **359** 99
- [50] Jiang R, Wu Q S 2005 *Eur. Phys. J. B* **46** 581

A hybrid traffic flow model with considering the influence of adaptive cruise control vehicles and on-ramps*

Hua Xue-Dong¹⁾²⁾ Wang Wei^{1)2)†} Wang Hao¹⁾²⁾

1) (Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2) (Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing 210096, China)

(Received 27 October 2015; revised manuscript received 10 January 2016)

Abstract

Recently, autonomous vehicles and the relevant studies have attracted much attention. Adaptive cruise control (ACC), which is a kind of cruise control system for vehicles, automatically adjusts the vehicle speed to maintain a safe distance from vehicles ahead. Since the vehicle with ACC (called ACC vehicles) is semi-autonomous, the performance of ACC vehicle must be quite different from that of manual vehicle. The characteristics of traffic flow with ACC vehicles should be carefully investigated, especially when the traffic system is a bit complicated, such as on-ramp system.

The primary objective of this paper is to propose a traffic flow model to simulate the traffic flow with considering the influence of ACC vehicles and on-ramps. Based on the model proposed by Yuan in 2009 [Yuan Y M 2009 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China)], a hybrid traffic flow model with considering the influence of ACC vehicles and on-ramps is developed. Considering the differences between ACC and manual vehicles, a car-following sub-model based on constant time headway principle is developed for ACC vehicles, while an MCD cellular automata sub-model is proposed for manual vehicles. Besides, a new parameter, λ , is introduced to show different psychologies of drivers when changing lane from on-ramp to main road. The lane-changing model for vehicles on-ramp is developed as well. At the end, numerical simulation is demonstrated to study the influence of ACC vehicles on traffic flow at on-ramp, and to reveal the influence of parameters on the proposed hybrid model (i.e., the length of merge area, the desired time headway of ACC vehicle and λ) on model performance.

The results of this paper are as follows. 1) When the ACC vehicles exist in a traffic system, the performance of traffic flow in a on-ramp area is improved: the influence of merged vehicles on main road is reduced, and the average speed and volume are increased. 2) The increase of ACC vehicles can help to alleviate traffic congestion in both congestion duration and scope aspects. 3) The newly proposed hybrid model is sensitive to the length of merge area l_w , the desired time headway of ACC vehicle H_d and lane-changing psychology parameter λ : the decrease of H_d and the increase of λ can both improve the average speed and volume of traffic flow. In addition, when the volume of on-ramp is small, the speed and volume of main road can be improved by enlarging l_w . When the volume of on-ramp is large, a small l_w will be better for traffic flow.

Keywords: adaptive cruise control, hybrid traffic flow model, car-following model, cellular automata model

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.65.084503

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725402), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51338003), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51478113), and the Scientific Research Foundation of Graduate School of Southeast University, China (Grant No. YBJJ1345).

† Corresponding author. E-mail: wangwei@seu.edu.cn