

混入智能车的下匝道瓶颈路段交通流建模与仿真分析

董长印 王昊 王炜 李烨 华雪东

Hybrid traffic flow model for intelligent vehicles exiting to off-ramp

Dong Chang-Yin Wang Hao Wang Wei Li Ye Hua Xue-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 144501 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172752

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172752>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[道路交通的流体物理模型与粒子仿真方法](#)

Physics model of fluid and particle simulation method for road traffic

物理学报.2017, 66(22): 224501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224501>

[多路段元胞自动机交通流模型](#)

Multi-section cellular automata model of traffic flow

物理学报.2017, 66(19): 194501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.194501>

[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>

[考虑动态车间距的一维元胞自动机交通流模型](#)

One-dimensional cellular automaton model of traffic flow considering dynamic headway

物理学报.2015, 64(2): 024501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024501>

[中小学门口道路上学期间的一个元胞自动机模型](#)

A cellular automaton model for the road in front of elementary and middle school gates during students going to school

物理学报.2014, 63(9): 094502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094502>

混入智能车的下匝道瓶颈路段交通流建模与仿真分析*

董长印¹⁾²⁾ 王昊^{1)2)†} 王伟¹⁾²⁾ 李焱¹⁾²⁾ 华雪东¹⁾²⁾³⁾

1) (东南大学交通学院, 城市智能交通江苏省重点实验室, 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)

3) (东南大学建筑学院, 南京 210096)

(2017年12月27日收到; 2018年5月14日收到修改稿)

以下匝道瓶颈路段为研究背景, 以手动驾驶汽车和两类智能车为研究对象, 包括自适应巡航 (ACC) 汽车和协同自适应巡航 (CACC) 汽车, 建立了混入智能车的混合交通流模型. 在车辆的纵向控制层面, 分别构建了手动驾驶汽车改进舒适驾驶元胞自动机规则和智能车的跟驰模型; 基于车辆下匝道行驶特性, 引入车辆感知范围 R 、换道控制区域 L_{LC} 、换道冒险因子 λ 等参数, 建立了控制车辆横向运动的自由换道和强制换道模型. 通过对混合交通流模型进行数值仿真发现, CACC 车辆混入率 P_{CACC} 、车辆感知范围 R 、换道区域长度 L_{LC} 和换道冒险程度 λ 均对下匝道交通系统产生影响. 当 CACC 车辆混入率低于 0.5 时, CACC 退化为 ACC 的概率增大, 系统稳定性下降, 交通拥堵呈恶化趋势; 当 CACC 车辆混入率大于 0.5 时, 车辆运行速度显著提升, 拥堵消散能力提高. 增大车辆感知范围、加长换道区域长度、提高换道冒险程度, 都能够有效缓解改善下匝道瓶颈路段主线的拥挤状况, 而对匝道运行效率影响并不明显.

关键词: 智能车, 换道模型, 下匝道路段, 自适应巡航控制

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.67.20172752

1 引言

随着社会不断进步, 经济快速发展, 科学技术也在突飞猛进, 汽车行业是典型的领域之一. 近年来, 一系列先进的传感器、控制器和解决方案造就了智能车的诞生, 用以解决交通拥堵、道路安全、能源消耗和环境污染等问题^[1-9]. 本文研究智能车对改善下匝道瓶颈路段交通系统的作用, 同时改变交通系统中其他参数, 探索其对车辆行驶速度和道路断面流量的影响.

自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC)^[10-17] 以及新一代的协同自适应巡航控制 (cooperative adaptive cruise control,

CACC)^[18-36] 是两种典型的智能车纵向控制模型. 两者基于车辆感知系统采集道路内车辆位置和速度等信息, 通过内置算法逻辑决定下一时刻的运动状态. 已有学者研究了 ACC 车辆和 CACC 车辆混入现有交通系统后, 对系统的运行效率^[11-19]、安全性^[20-29]、稳定性^[30-34] 等影响. 应用元胞自动机 (cellular automata, CA) 模拟交通流中车辆微观运动状态以了解车辆间的相互作用机理已成为典型方法之一^[37-46]. Hua 等^[26,27] 建立了考虑 ACC 车辆的上匝道系统混合交通流模型; Jiang 等^[47-50] 研究了包括交通状态相位变化在内的交通流三参数特性; Qin 等^[30] 重点关注了混有 CACC 车辆的异质交通流稳定性及其基本图. 然而, 以往的研

* 国家自然科学基金 (批准号: 51478113, 51508122)、江苏省博士后科研资助计划 (批准号: 1701082B) 和东南大学优秀博士学位论文培养基金 (批准号: YBJJ1734) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: haowang@seu.edu.cn

究并未涉及CACC退化为ACC时的情形^[51],未考虑手动驾驶汽车、CACC车辆和ACC车辆共同组成的交通系统的运行特征.同时,下匝道是影响高速公路主线交通的瓶颈路段,也是极易发生事故、拥堵的地带^[52],缓解下匝道瓶颈路段交通拥堵能够有效提高交通系统整体运行效率和行车安全.Kang和Yang^[53]提出了敏感换道的CA下匝道交通流模型,重点研究了不同接近匝道口距离下换道概率的模型;Liu等^[54]基于微分方程建立换道模型,揭示了换道行为对下匝道交通环境的影响;Zhang和Ioannou^[55]则从交通控制角度,与可变限速结合分析了换道策略对交通三参数的影响.然而已有文献中极少涉及面向智能车的下匝道换道模型研究.一方面,下匝道区域属于高速公路典型的交织段,交通组织相对混乱,外部道路环境决定了研究对象的复杂性;另一方面,已有换道模型仅适用于手动驾驶汽车,面向下匝道瓶颈路段的智能车强制换道模型复杂程度远高于基本路段,直接导致鲜有对智能车下匝道行为模型的研究.

鉴于此,本文应用改进舒适驾驶(modified comfortable driving, MCD)模型^[47]和加州伯克利大学先进交通合作伙伴(partners for advanced transportation technology, PATH)实验室通过实车实验标定的ACC和CACC模型^[18-19,35-36]分别仿真手动驾驶汽车和智能车的跟车行为.基于下匝道瓶颈路段车辆行驶特性,建立自由换道和强制换道模型.此外,考虑主线交通需求、下匝道车

辆比例、CACC车辆混入率、车辆感知范围、换道区域长度以及换道冒险程度等因素,模拟不同场景的下匝道瓶颈路段交通流运行状况.依据研究结果为未来高速公路混合交通流的管理与控制提供理论指导和实践参考.

2 混合交通流模型

在车辆的纵向控制方面,本文选用应用广泛的MCD模型^[47]用以仿真手动驾驶汽车的跟车行为,智能车的跟驰模型则采用加州伯克利大学PATH实验室通过实车标定的ACC和CACC模型^[18,19,35,36].针对手动驾驶汽车和智能车在环境感知特性和换道决策过程的差异性,本文建立不同的换道模型分别模拟两种车辆的自由换道和强制换道行为,即控制车辆的横向运动.

2.1 交通场景设置

在高速公路下匝道瓶颈路段,主线和匝道两者通过出口车道相连,如图1所示.在该三车道交通系统中,所有车辆在区段A内均执行稳定的跟车/跟驰模型,下匝道的车辆在区段B和区段C内换至外侧车道,再经外侧车道内平行于出口车道的区段C进入匝道,按照匝道行驶规则驶离主线,设定强制换道区域的长度为 L_{LC} .区段D禁止换道,车辆保持直行.图中绿色色块表示下匝道车辆换道起始区域.

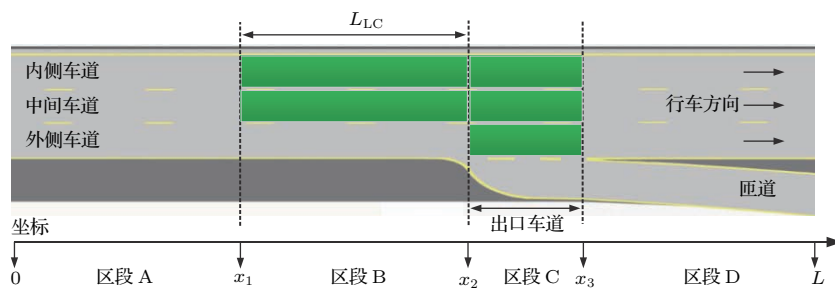


图1 下匝道交通系统示意图

Fig. 1. Schematic diagram of off-ramp traffic system.

2.2 纵向控制模型

研究中纵向控制模型分为CA跟车规则和连续跟驰子模型.其中CA跟车规则选择MCD CA模型^[47]仿真手动驾驶汽车,分为6个并行步骤.

步骤1 实际观测发现随机减速普遍存在于交通系统中,确定随机慢化参数 $p_n(t+1)$,该概率与速度 $v_n(t)$ 、间距 $b_{n+1}(t)$ 和两类时间 t_h, t_s 相关:

$$p_n(t+1) = p[v_n(t), b_{n+1}(t), t_h, t_s], \quad (1)$$

$$p[v_n(t), b_n + 1(t), t_h, t_s] = \begin{cases} p_b, & b_n + 1(t) = 1, \quad t_h < t_s, \\ p_0, & v_n(t) = 0, \quad t_{st} \geq t_c, \\ p_d, & \text{else,} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $v_n(t)$ 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; 两种时间 $t_h = d_n(t)/v_n(t)$, $t_s = \min(v_n(t), h)$, 分别表示到达前车位置所需时间和依赖于车速的作用极限时间, 其中 $d_n(t)$ 为第 n 辆车在时刻 t 时与前车的距离; h 为安全车头时距, 决定了与刹车灯的交互作用; t_{st} 为车辆停止时间. (1) 式和 (2) 式表明刚停下的车辆对慢启动规则仍十分敏感, 只有停止超过一定时间 t_c , 驾驶员的敏感程度才会下降.

步骤2 车辆加速过程

当前车刹车灯不亮或者到达前车位置所需时间大于极限时间, 并且当前车辆未停止, 即满足 $b_{n+1}(t) = 0$ 或 $t_h \geq t_s$, 并且 $v_n(t) > 0$ 时, 以两个元胞格的步长加速:

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

式中 v_{\max} 为车辆最大速度;

当本车静止, 即 $v_n(t) = 0$ 时, 以 1 个元胞格的步长加速:

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

否则

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

步骤3 确定刹车过程

下一时刻速度由有效距离 d_n^{eff} 和当前速度 $v_n(t)$ 决定:

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

其中

$$d_n^{\text{eff}} = d_n + \max(v_{\text{anti}} - g_{\text{safety}}, 0), \quad (7)$$

$$v_{\text{anti}} = \min(d_n + 1, v_n + 1), \quad (8)$$

式中 d_n 为第 n 辆车与前车的距离; v_{anti} 为下一更新步长前车的期望速度; g_{safety} 为模型参数之一, 控制预测的有效性.

步骤4 随机慢化过程

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

$$v_n(t + 1) = \max(v_n(t) - 1, 0), \quad (9)$$

其中 $\text{rand}(\)$ 表示 0 到 1 的随机实数.

步骤5 更新刹车灯状态 b_n 与 t_{st} 两个参数:

$$b_n(t + 1) = \begin{cases} 0, & v_n(t + 1) > v_n(t), \\ 1, & v_n(t + 1) < v_n(t), \\ b_n(t), & \text{else.} \end{cases} \quad (10)$$

$$t_{st} = \begin{cases} t_{st} + 1, & v_n(t + 1) = 0, \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (11)$$

步骤6 位置更新步骤

$$x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1). \quad (12)$$

MCD 模型采用恒定车头时距 (constant time headway, CTH) 策略. 上述参数中距离单位是元胞格 (cell); 时间单位是 s; 则速度单位是 cell/s.

当前车辆为智能车, 且本车道的前车同为智能车时, CACC 系统正常工作, 其跟驰模型 [18,19,35,36] 如下:

$$e_n(t + 1) = x_{n-1}(t + 1) - x_n(t + 1) - t_{hw}v_n(t + 1), \quad (13)$$

$$v_n(t + 1) = v_n(t) + k_p e_n(t + 1) + k_d \dot{e}_n(t + 1), \quad (14)$$

$$x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1)\Delta t, \quad (15)$$

式中 e 为实际车间距与期望车间距的误差, 是关于位置距离和本车速度的线性函数; 下一时刻速度由当前车速 $v_n(t)$ 、误差 e 及微分 \dot{e} 决定; k_p 和 k_d 为模型控制参数; t_{hw} 为期望车间时距; Δt 为时间间隔.

当前车辆为 CACC 车辆, 且本车道前车为手动驾驶汽车时, 两车之间无法实现数据传递, 即 CACC 车辆失去车车通信功能, 仅依赖于车辆自身的环境感知系统, 此时 CACC 退化成为 ACC [51], 此时车辆状态更新按照如下的跟驰模型 [18,19,35,36] 进行:

$$a_n(t + 1) = k_1(x_{n-1}(t + 1) - x_n(t + 1) - t_{hw}v_n(t + 1)) + k_2(v_{n-1}(t + 1) - v_n(t + 1)), \quad (16)$$

$$v_n(t + 1) = v_n(t) + a_n(t + 1)\Delta t, \quad (17)$$

$$x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1)\Delta t + \frac{a_n(t + 1)(\Delta t)^2}{2}, \quad (18)$$

式中加速度 a 是关于位置距离、本车速度、速度差的线性函数; k_1 和 k_2 为模型控制参数.

2.3 横向控制模型

下匝道交通系统中, 换道行为仅发生在区域B和C, 即匝道上游 L_{LC} 范围和平行于出口车道的外侧车道内. 当非下匝道车辆同时满足如下三个条件时, 则进行换道:

$$d_n(t) < \min[v_n(t) + 1, v_{\max}], \quad (19)$$

$$d_{l,n}(t) > d_n(t), \quad (20)$$

$$d_{f,n}(t) > d_{\text{safe}}, \quad (21)$$

式中 $d_{l,n}(t)$ 和 $d_{f,n}(t)$ 分别表示在 t 时刻车辆 n 与目标车道前车和后车之间的距离; d_{safe} 为确保不会发生撞车的安全距离.

(20) 式和 (21) 式均为确定性条件, 通过实时环境感知和判断即可实现; (22) 式中存在的惟一变量 d_{safe} 决定了换道的危险程度或自由程度. 该值通常有两种理论极限:

1) $d_{\text{safe}} = v_{\max}$, 即 $d_n(t) > v_{\max}$, 这样的安全距离确保下一时刻两车在任何速度条件下均不会发生碰撞, 此种条件是最安全条件, 适用于本文所设交通场景的手动驾驶汽车;

2) $d_{\text{safe}} = |v_f(t) - v_n(t)|$, 即 $d_n(t) > |v_f(t) - v_n(t)|$, $v_f(t)$ 为目标车道后车的速度, 该种极限安全距离为两车的速度差(假设仿真步长为 1 s), 因此该条件是最冒险条件.

对于智能汽车, 不会采取最冒险条件, 若仅以最安全条件为准则, 显然会增加车辆的平均行程时间, 降低道路系统的运行效率, 与车辆设计初衷相矛盾. 因此, 本文引入冒险因子 λ 均衡两种极限条件:

$$d_{\text{safe}} = \lambda|v_f(t) - v_n(t)| + (1 - \lambda)v_{\max}. \quad (22)$$

不难看出, λ 值越大, 车辆换道时与后车的间距要求越低, 换道风险越高, 意味着冒险程度越大; λ 值越小, 车辆换道时与后车的间距要求越高, 换道行为越保守, 越追求安全.

随着计算机、信息技术的发展, 先进的传感器不断融入智能车的感知系统中, 同时也让辅助驾驶, 乃至未来的自动驾驶变为可能. 本文以智能车环境感知和通信范围内所采集的数据为基础, 以辅助智能车安全换道为目标, 提出了一种新型强制换道模型, 该模型分为以下 5 个步骤.

步骤1 自动采集数据

智能车通过自身配置的环境感知和车间通信系统, 根据自身车辆的转向需求, 获取半径 R 范围内目标车道前后车的位置、速度和间距信息用以辅助换道决策, 得到集合 X, V 和 G . 当前车辆的位置为 x^* , 速度值为 v^* .

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}, \quad (23)$$

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}, \quad (24)$$

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_{k-1}\}. \quad (25)$$

步骤2 确定理论安全间距

计算 G 对应的理论安全间距 G' :

$$s(v) = v/3 + 10, \quad (26)$$

$$g'_i = s(v^*) + s(v_{i+1}), \quad (27)$$

$$G' = \{g'_1, g'_2, \dots, g'_{k-1}\}, \quad (28)$$

式中 $s(v)$ 为单车对应的理论安全间距, $i = 1, 2, \dots, k - 1$, 下同.

步骤3 实测间距优劣排序

以实测间距 g_i 与理论间距 g'_i 的商 q_i 为间距优劣的评价指标, 并重新对实测间距集合内元素进行降序排序. 商值越大, 说明当前车辆选择此间距汇入的安全性越高, 排序越靠前.

$$q_i = g_i/g'_i, \quad (29)$$

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{k-1}\}. \quad (30)$$

步骤4 实测间距安全分类

当实测间距 g_i 满足安全性要求且在当前车辆上游, 放入集合 S_f 中; 满足安全性要求但位于当前车辆下游时, 归入集合 S_r 中. 当实测间距 g_i 不满足安全性要求且在当前车辆上游, 放入集合 U_f 中; 不满足安全性要求且位于当前车辆下游时, 归入集合 U_r 中.

$$g_i \in \begin{cases} S_r, & q_i \geq 1 \text{ 且 } x_i < x^*, \\ S_f, & q_i \geq 1 \text{ 且 } x_i \geq x^*, \\ U_f, & q_i < 1 \text{ 且 } x_i \geq x^*, \\ U_r, & q_i < 1 \text{ 且 } x_i < x^*. \end{cases} \quad (31)$$

所有实测间距分入四个间距集合后, 均按照安全性降序排列.

步骤5 换道选择与执行

间隙选择的顺序是 $S_r \rightarrow S_f \rightarrow U_f \rightarrow U_r$, 前两个集合均将距离当前车辆最近间距作为待定间距, 后两个集合则每次待定最安全间距, 待定评价的依据如下:

$$t_{pre} = \frac{x_{des} - x^*}{v^*}, \quad (32)$$

$$x'_i = x_i + v_i t_{pre}, \quad (33)$$

$$x'_{i+1} = x_{i+1} + v_{i+1} t_{pre}, \quad (34)$$

$$g'' \geq g'. \quad (35)$$

式中 t_{pre} 为当前车辆达到终点位置 x_{des} 所需的时间.

当前车辆和目标间距的两车均继续保持当前状态, 即速度不变, 计算当前车辆达到终点位置 x_{des} 时, 待定间距的区段仍然安全或者安全性未下降, 则认为该间距即为目标间距. 当感知范围内未检测到车辆或仅存在一辆车时, 则直接换道汇入目标车道.

3 数值模拟与仿真分析

在数值模拟时, 本文将长度为 L 的高速公路沿行车方向做离散化处理, 每个元胞格为 1 m, L 为 4 km, 主线共计 4000 个元胞. 控制匝道长度的参数 x_2 和 x_3 分别为 2600 和 3000 m, 初始 x_1 值设为 2200 m, 即 $L_{LC} = 400$ m (图 1). 在 CA 模型中, 每辆车占据 5 个元胞, 其他变量参考文献 [52]: $t_c = 9$ s, $p_d = 0.25$, $p_b = 0.94$, $p_0 = 0.5$, $h = 6$, $g_{safety} = 7$ cells. 由 PATH 实验室开展的智能车实地实验可知, CACC 模型的参数标定结果为 $k_p = 0.45$, $k_d = 0.25$, ACC 模型的参数标定结果为 $k_1 = 0.23$ s⁻² 和 $k_2 = 0.07$ s⁻¹ [18,19,35,36]. 智能车在 CACC 和 ACC 系统工作时的 CTH 分别为 1.0 和 2.0 s. 主线和匝道限速分别为 33 和 22 m/s.

数值模拟采用开放性边界条件, 车辆以概率 P_{main} 从主线起始端产生, 其中下匝道车辆的比例为 P_{off} , CACC 车辆市场占有率为 P_{CACC} . 仿真实验基于 MATLAB 平台, 每组实验运算 10 次, 求其平均值作为研究结果, 以消除随机性影响, 每次迭代 1 h, 即 3600 个时间步长 (s). 值得注意的是, 在每个时间步长 1 s 内, CA 模型更新 1 次而智能车状

态需更新 10 次, 即智能车每 0.1 s 感知交通系统状态并依据跟驰模型实现自身运行速度和位置的更新, 手动驾驶汽车则保持速度恒定, 位置信息通过线性插值获得 [27]. 模拟时每隔 0.1 s 保存一次所有车辆的状态. 改变主线车辆产生概率 P_{main} 、下匝道车辆比例 P_{off} , CACC 车辆混入率 P_{CACC} 、车辆感知范围 R 、换道区域长度 L_{LC} 以及换道冒险程度 λ 等参数值, 模拟不同情况下混入智能车的下匝道瓶颈路段交通流运行状况.

3.1 CACC 车辆混入率对交通系统的影响

当 $P_{main} = 0.6$, $P_{off} = 0.15$, $R = 200$ m, $L_{LC} = 400$ m, $\lambda = 0.5$ 时, 主线三车道在四种 CACC 车辆混入率 P_{CACC} 下的速度热力图如图 2 所示. 从图中可以看出, 随着 CACC 车辆混入率的增加, 下匝道交通系统并没有呈逐渐改善的态势. 具体而言, 在手动驾驶汽车和 CACC 车辆各占一半时 ($P_{CACC} = 0.5$), 该种情形下的交通流运行速度在这四种交通场景中平均水平最低, 尤其在靠近匝道出口的上游区域, 不仅体现在拥堵影响面积上, 也体现在拥堵降速幅度上, 如图 2 (c1)—(c3) 所示. 当 CACC 车辆混入率低于 0.5 时, 随着 CACC 车辆的增加, 交通系统的拥堵面积增大, 拥堵扩散至上游的距离加长, 整体的车辆平均速度呈下降趋势; 当 CACC 车辆混入率上升至 0.75 时, 交通系统运行效率相对最优, 局部产生的交通拥堵在短时间内即可消除, 且保证拥堵波及范围不超过 1 km (对应道路坐标长度为 [1600, 2600], 图 2 (d1)—(d3)), 体现出 CACC 车辆能够有效提高交通流运行速度和拥堵消散能力.

对比不同车道内速度差异, 同一交通场景下, 内侧车道受下匝道影响最小, 外侧车道次之, 中间车道最为敏感. 来自内侧车道和中间车道的所有下匝道车辆均需在中车道的特定换道区域内完成强制换道, 因此发生在内侧车道上的换道行为多于中间车道; 外侧车道的直行车辆为避让下匝道车辆而选择向内侧变道, 使得中间车道的直行车辆增加, 因此, 相比于外侧车道的车辆提前减速和有序排队, 中间车道的下匝道车辆受到直行车辆的干扰大于外侧车道, 因而产生局部拥堵的概率更大 (图 2 (a2)—(d2)).

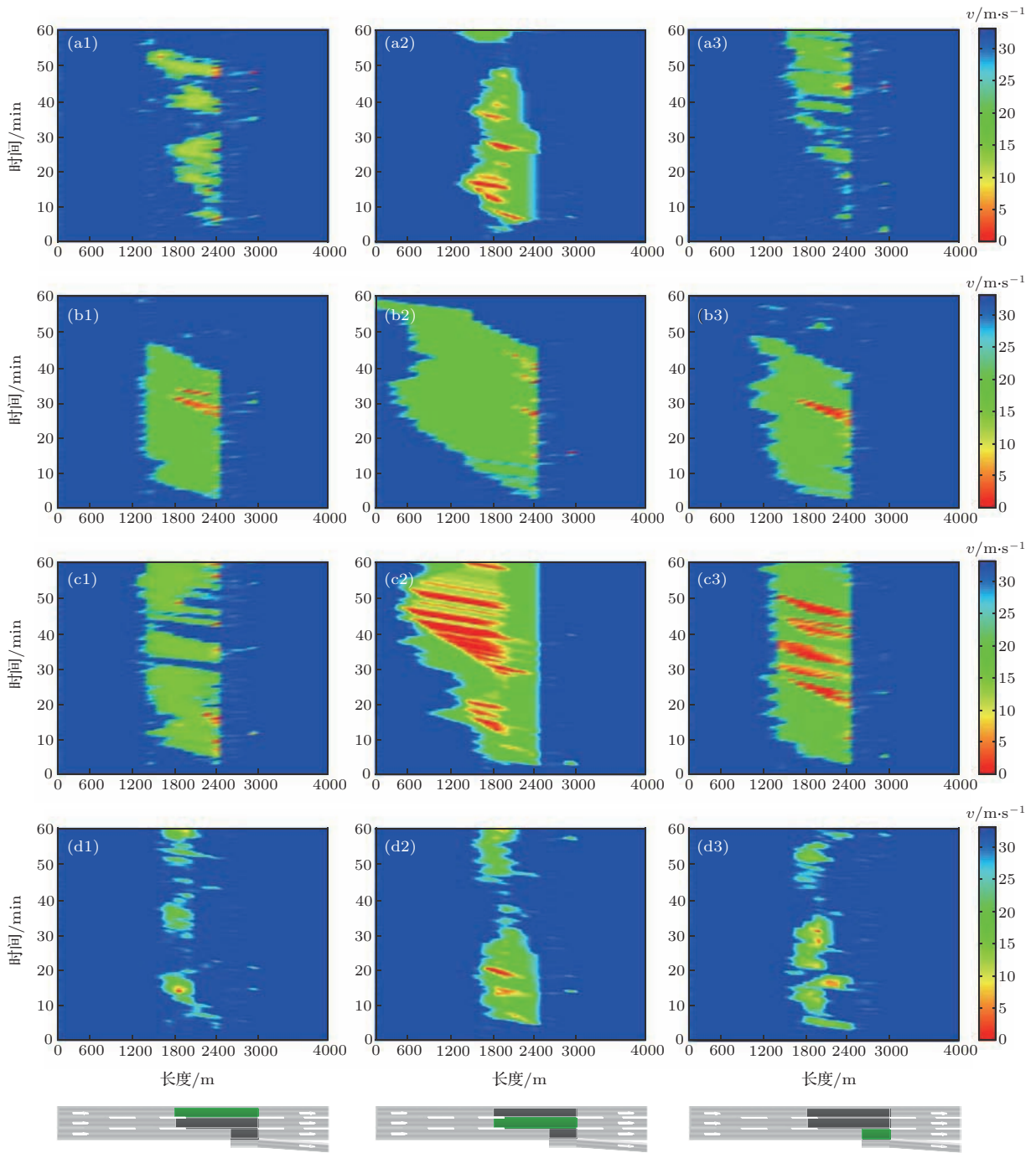


图2 不同车道的速度随 P_{CACC} 变化的热力图 (a) $P_{CACC} = 0$; (b) $P_{CACC} = 0.25$; (c) $P_{CACC} = 0.5$; (d) $P_{CACC} = 0.75$; (a1)—(d1) 内侧车道; (a2)—(d2) 中间车道; (a3)—(d3) 外侧车道

Fig. 2. Heat map of speeds in three lanes vs. P_{CACC} : (a) $P_{CACC} = 0$; (b) $P_{CACC} = 0.25$; (c) $P_{CACC} = 0.5$; (d) $P_{CACC} = 0.75$; (a1)—(d1) median lane; (a2)—(d2) center lane; (a3)—(d3) shoulder lane.

图3表示交通系统由全手动驾驶汽车渐变为全CACC车辆的通行能力过程($R = 200\text{ m}$, $L_{LC} = 400\text{ m}$, $\lambda = 0.5$), 分别考察五种下匝道车辆比例下的交通场景. 仿真时设定 P_{main} 由0增加至1, 期间流量的最大值作为道路通行能力. 总体看来, 曲线图分为两个部分: 1) 在CACC车辆混入率 P_{CACC} 达到0.5之前, 交通系统中CACC车辆的

增加意味着CACC车辆前车为手动驾驶汽车的概率增大, 进而CACC车辆退化为ACC车辆的概率随之增大, 该概率值在 $P_{CACC} = 0.5$ 时取得峰值, 对应道路通行能力的最小值, 因此在该阶段道路通行能力随着CACC车辆的增加而单调减小; 2) 在CACC车辆混入率 P_{CACC} 超过0.5时, CACC车辆车头时距短、反应速度快等特点转化为平均运行速

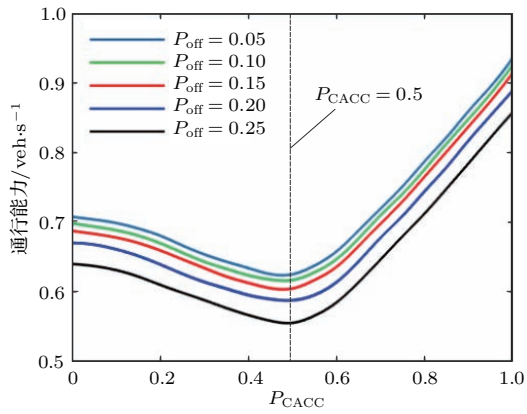


图3 P_{CACC} 和 P_{off} 对道路通行能力的影响
Fig. 3. Influence of P_{CACC} and P_{off} on road capacity.

度快、拥堵消散能力强、车队运行平稳等优势, 大幅增加了道路通行能力, 此阶段内的道路通行能力随着CACC车辆增多而呈近似线性增长. 量化分析如下: 假设初始时CACC车辆混入率为 P , 则手动驾驶汽车混入率为 $1 - P$. 当交通系统中所有CACC车辆无法退化成为ACC车辆时趋于稳定, 即CACC车辆前车均为手动驾驶汽车或手动驾驶汽车的后车均为CACC车辆, 此时交通系统中手动驾驶汽车混入率仍为 $1 - P$, CACC退化为ACC车辆的混入率为 $P(1 - P)$, CACC车辆混入率则为 P^2 . $P(1 - P)$ 在 $P = 0.5$ 处取极大值, $P > 0.5$ 时, ACC和手动驾驶汽车混入率均下降, CACC车辆混入率上升, 而CACC车辆跟车时距和反应时间短、换道引起的消极影响较小, 能够有效缓解交通拥堵, 提

高通行效率. 该结论与PATH实车实验^[18-19,35,36]以及荷兰Delft大学Gorter^[56]的研究结论一致.

此外, 下匝道车辆比例 P_{off} 也是影响道路通行能力的另一重要因素. 对比发现, 下匝道车辆比例较低($P_{off} < 0.15$)时, 通行能力随着 P_{off} 增加而降低的幅度较小, 在全CACC车辆($P_{CACC} = 1$)的交通场景中, 通行能力均超过0.9; 下匝道车辆逐渐增多($P_{off} > 0.15$)时, 同一交通情形下的道路通行能力下降幅度较大, 下匝道车辆比例对道路通行能力的影响显著. 当发生下匝道车辆比例 $P_{off} > 0.2$ 情况时, 高速公路管理部门应加强对道路网络的交通诱导, 分散该下匝道瓶颈路段的交通压力, 适当提高道路通行能力.

直行车辆驾驶行为同样影响该瓶颈路段的通行效率. 直行车辆遵从向左侧变道原则, 不选择右侧换道间隙即视为遵章. 表1统计出通行能力随CACC车辆混入率 P_{CACC} 和直行车辆遵章率 P_{obe} 的变化情况. 同一CACC车辆在相同混入率 P_{CACC} 下, 通行能力随着直行车辆遵章率 P_{obe} 的提高而增强; 随着CACC车辆的增加, 平均增长率先增后减, 在 $P_{CACC} = 0.5$ 取得最大值12.5%. 相比于遵章率 P_{obe} 对系统通行能力0.22左右增长的影响, CACC车辆混入率 P_{CACC} 能够对系统产生较大影响, 通行能力提高0.3以上, 平均变化在14.3%—22.0%.

表1 P_{CACC} 和 P_{obe} 对通行能力的影响
Table 1. Influence of P_{CACC} and P_{obe} on road capacity.

P_{obe}	P_{CACC}					极差	平均变化率/%
	0	0.25	0.50	0.75	1.00		
0	0.441	0.415	0.381	0.460	0.705	0.324	22.0
0.25	0.494	0.462	0.434	0.512	0.753	0.319	19.4
0.50	0.560	0.533	0.499	0.576	0.815	0.316	17.0
0.75	0.622	0.606	0.575	0.638	0.884	0.309	14.3
1.00	0.676	0.647	0.608	0.683	0.921	0.313	14.3
极差	0.235	0.232	0.227	0.223	0.216	—	—
平均增长率/%	11.3	11.8	12.5	10.4	6.9	—	—

3.2 车辆感知范围对下匝道瓶颈路段交通流的影响

根据3.1节实验分析可知, 中间车道是最拥挤车道, $P_{CACC} = 0.5$ 是道路通行能力最低时的条件,

因此考察 $P_{CACC} = 0.5$ 时的中间车道具有实践指导意义. 图4为该基本假设下不同车辆感知范围 R 对混合交通流的影响($P_{main} = 0.6, P_{off} = 0.15, P_{CACC} = 0.5, L_{LC} = 400 \text{ m}, \lambda = 0.5$), 图4左侧三列代表下匝道上游, 最右侧一列则代表下游, 所有

子图的横轴方向是位置, 纵轴方向是时间. 从图4可以看出, 车辆感知范围对下匝道瓶颈路段的下游区域影响不显著, 车辆运行平稳, 但对上游区域影响较大, 时空斑图与拥堵扩散紧密相关. 车辆感知范围不断增大, 为下匝道车辆提供更多的间隙选择机会, 同时增大选择安全间隙的概率, 降低对主线交通流的干扰. 如图4(a2)—(d2)所示, 当车辆

感知范围 R 由 200 m 增大至 400 m 时, 由换道导致的减速排队长度不断减小, 拥堵开始逐渐消散, 拥堵范围显著减小. 车辆感知范围 R 进一步增大后, 主线中间车道的交通流趋于稳定, 仅在匝道出口上游 300 m 范围内产生局部缓行现象 (图4(d2)), 此时交通系统受到下匝道瓶颈的影响降至最低.

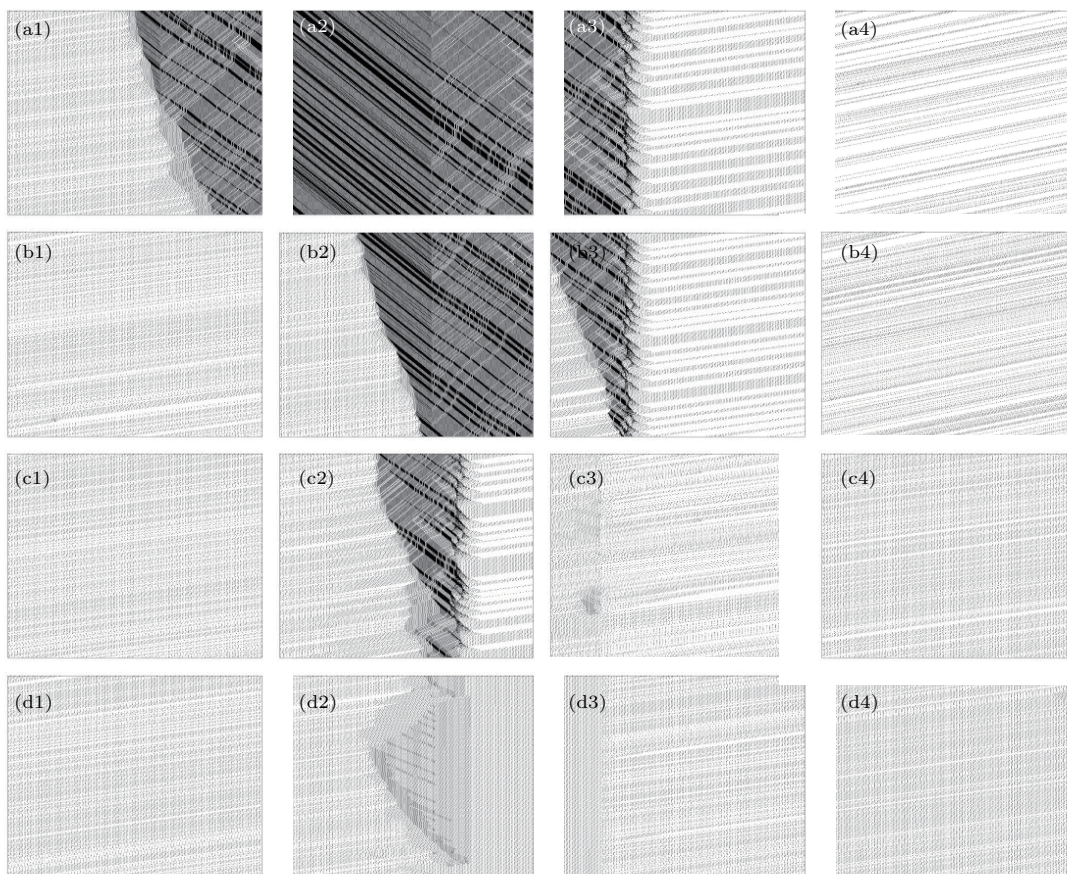


图4 不同车辆感知范围下的中间车道分流影响区时空斑图 (a) $R = 200$ m; (b) $R = 400$ m; (c) $R = 600$ m; (d) $R = 800$ m; (a1)—(d1) $L_{500} = [1500 \text{ m}, 2000 \text{ m}]$; (a2)—(d2) $L_{500} = [2000 \text{ m}, 2500 \text{ m}]$; (a3)—(d3) $L_{500} = [2500 \text{ m}, 3000 \text{ m}]$; (a4)—(d4) $L_{500} = [3000 \text{ m}, 3500 \text{ m}]$

Fig. 4. Temporal-spatial pattern of different perception ranges in center lane at diverge influence area: (a) $R = 200$ m; (b) $R = 400$ m; (c) $R = 600$ m; (d) $R = 800$ m; (a1)—(d1) $L_{500} = [1500 \text{ m}, 2000 \text{ m}]$; (a2)—(d2) $L_{500} = [2000 \text{ m}, 2500 \text{ m}]$; (a3)—(d3) $L_{500} = [2500 \text{ m}, 3000 \text{ m}]$; (a4)—(d4) $L_{500} = [3000 \text{ m}, 3500 \text{ m}]$.

图5则从速度角度展示了该下匝道瓶颈路段四个车道在不同车辆感知范围 R 下的速度表现差异 ($P_{\text{off}} = 0.15$, $P_{\text{CACC}} = 0.5$, $L_{\text{LC}} = 400$ m, $\lambda = 0.5$): 车辆感知范围越大, 平均速度越高, 四个车道均遵循上述规律, 但与主线三车道相比, 匝道速度受到车辆感知范围的影响最小. 这是由于匝道为单车道, 不存在换道行为, 不易发生拥堵, 因而车辆运行平稳. 相反, 主线交通对车辆

感知范围更为敏感, 尤其是在主线车辆产生概率较大 ($P_{\text{main}} > 0.8$) 时, 随着 R 的增大, 平均速度逐渐增大而增幅呈减小趋势. 当交通流量较低 ($P_{\text{main}} < 0.4$) 时, 车辆感知范围对主线三车道速度影响并不明显. 值得注意的是, 四组车辆感知范围下的外侧车道对速度降低的 P_{main} 临界点最为清晰, 外侧车道次之, 中间车道近乎均集中在 $P_{\text{main}} = 0.4$ 附近.

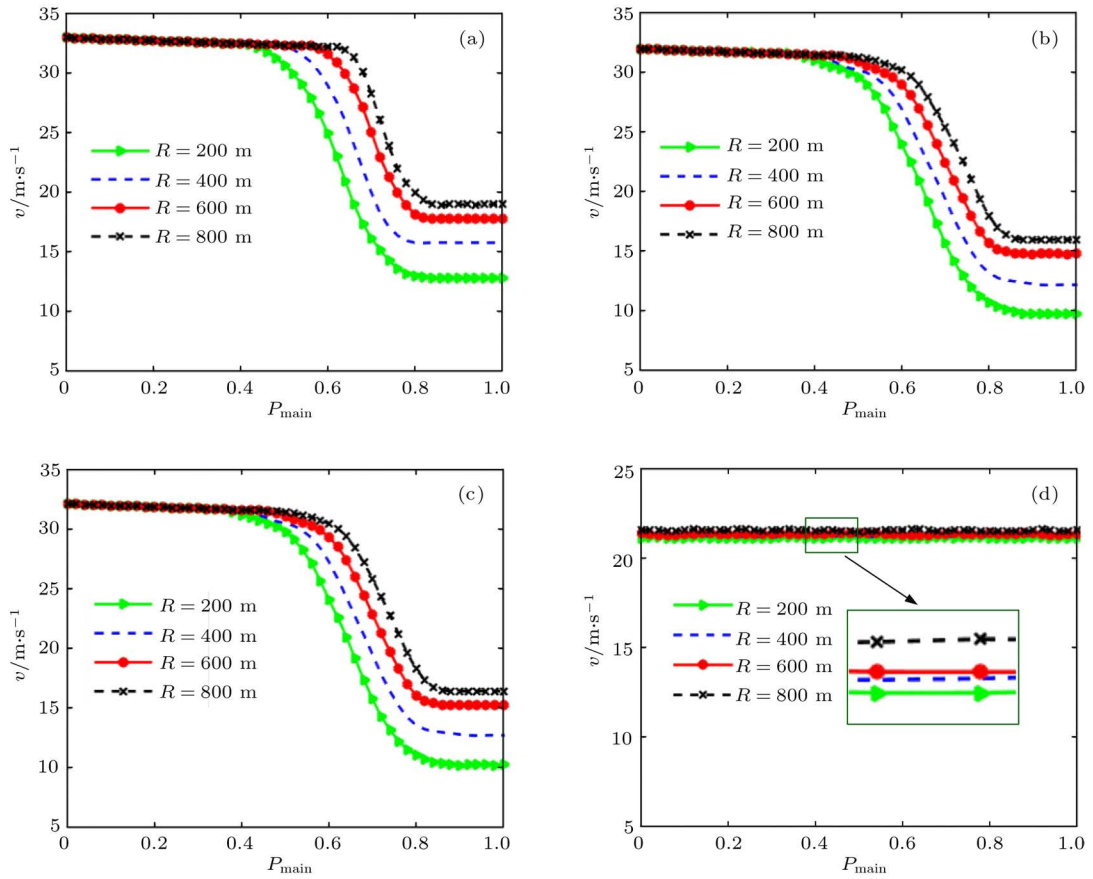


图5 车辆感知范围对速度的影响 (a) 内侧车道; (b) 中间车道; (c) 外侧车道; (d) 匝道
 Fig. 5. Influence of perception range on speed: (a) median lane; (b) center lane; (c) shoulder lane; (d) off ramp.

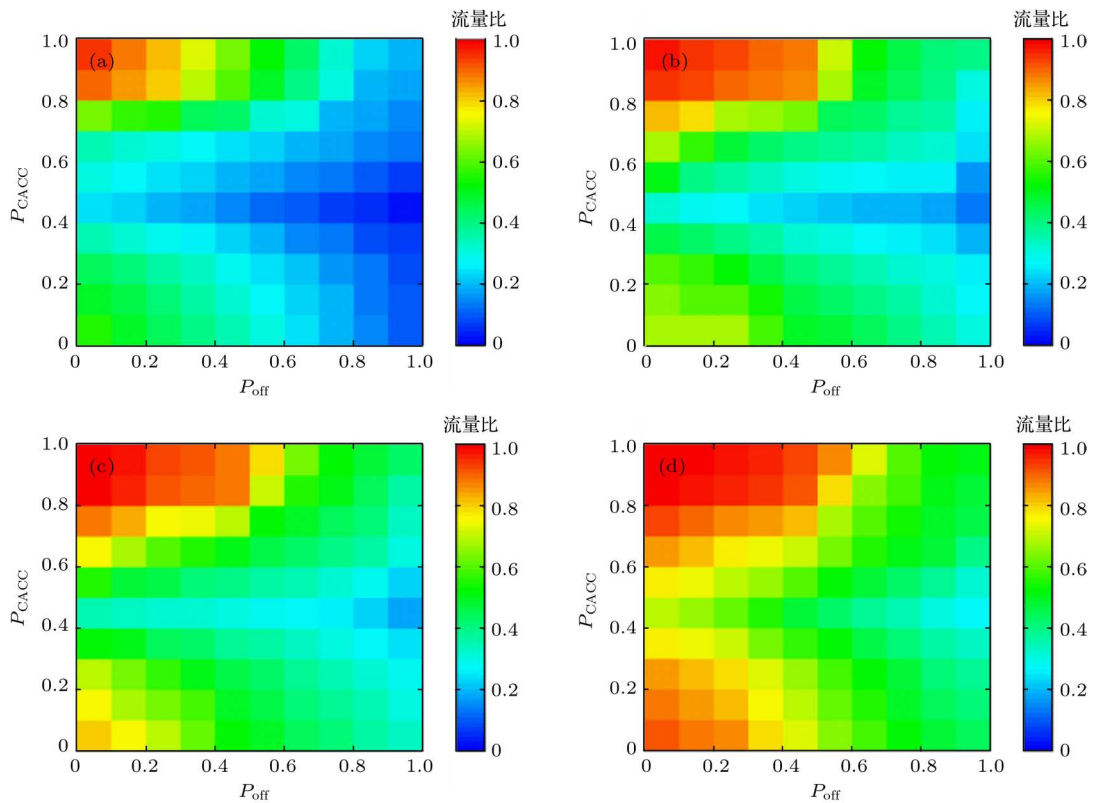


图6 流量随 P_{CACC} 和 P_{off} 变化的热力图 (a) $R = 200$ m; (b) $R = 400$ m; (c) $R = 600$ m; (d) $R = 800$ m
 Fig. 6. Heat map of volume vs. P_{CACC} and P_{off} : (a) $R = 200$ m; (b) $R = 400$ m; (c) $R = 600$ m; (d) $R = 800$ m.

当 $P_{\text{mian}} = 0.6$, $L_{\text{LC}} = 400$ m, $\lambda = 0.5$ 时, 图6从流量层面刻画了下匝道交通系统受到车辆感知范围、下匝道车辆比例和 CACC 车辆混入率的影响, 图中流量比是指通过下匝道瓶颈路段上游区域的最大流量与系统初始产生流量之比. 流量比越接近于1, 车辆通行越顺畅, 系统运行效率越高. 利用控制变量法分析发现, 车辆感知范围和 CACC 车辆混入率一定, 流量比总是随着下匝道车辆比例增加而降低; 车辆感知范围和下匝道车辆比例不变, 流量比随着 CACC 车辆混入率上升而先减小后增大, 并在 $P_{\text{CACC}} = 0.5$ 附近出现最低值, 结论与前文一致; 控制下匝道车辆比例和 CACC 车辆混入率两参数恒定, 随着车辆感知范围的扩大, 流量比逐渐增大, 显著表现在低下匝道车辆比例和高 CACC 车辆混入率情形. 相比之下, 相同交通情景下, 同时增加 CACC 车辆混入率和增大其感知范围能够有效缓解高下匝道车辆比例下的交通拥堵, 该结论对城市快速路下匝道瓶颈路段管控具有理论参考价值.

3.3 换道区域长度对下匝道瓶颈路段交通流的影响

当 $P_{\text{mian}} = 0.6$, $R = 200$ m, $\lambda = 0.5$ 时, 下匝道系统在不同换道区域长度、下匝道车辆比例和 CACC 车辆混入率的速度热力图如图7所示. 交通系统在低下匝道车辆比例和高 CACC 车辆混入率时的速度水平较高, 随着下匝道车辆比例的增大, 越来越多的车辆须采取强制换道措施汇入目标车道, 使得系统速度骤降, 此时再增加 CACC 车辆市场占有率对改善该下匝道交通系统的程度作用有限. 从换道区域长度的角度分析, 在下匝道车辆比例较高或者车辆混入率 $P_{\text{CACC}} = 0.5$ 附近时, 增大换道区域长度则能够显著提升车辆运行速度. 当下匝道车辆需求增大而 CACC 车辆退化效应显著时, 由于换道区域所限, 大量车辆集中在较短长度内完成一次甚至三次换道行为, 在减小安全换道间隙选择范围同时, 增加了强制换道带来的安全风险, 即

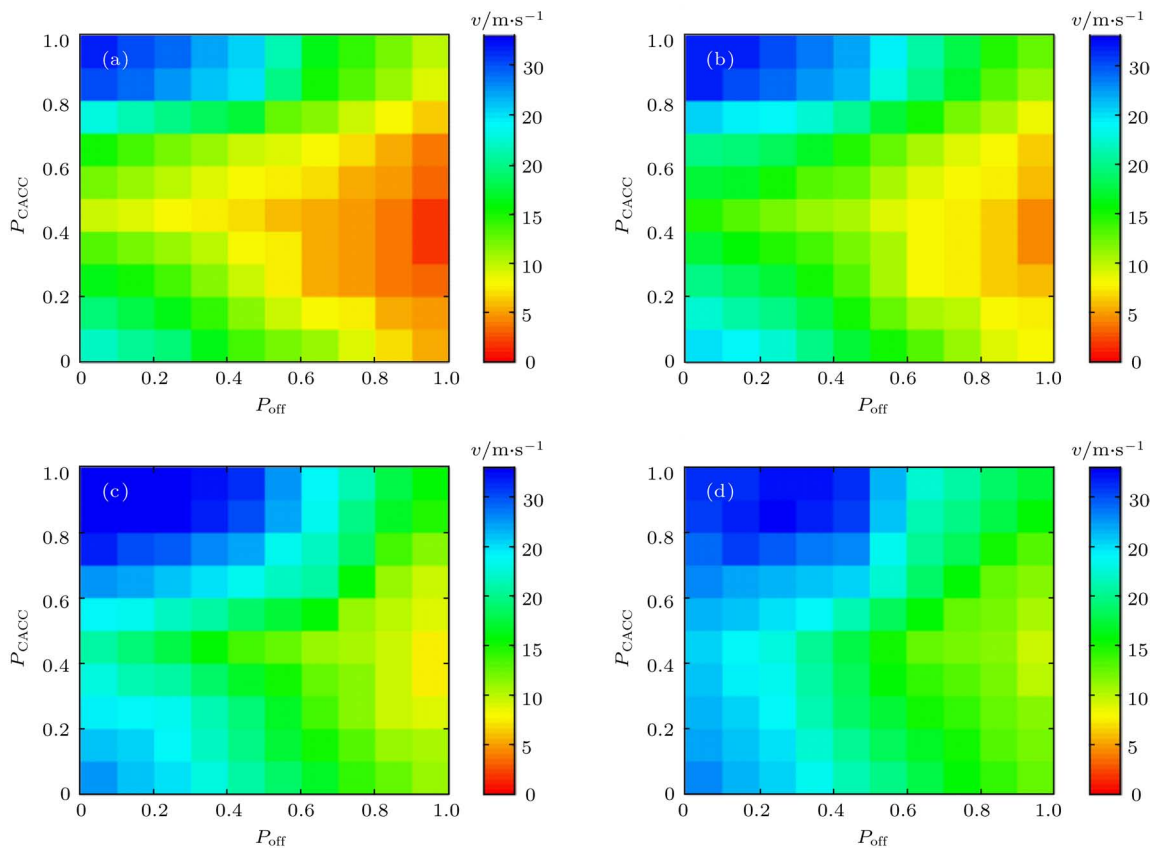


图7 速度随 P_{CACC} 和 P_{off} 变化的热力图 (a) $L_{\text{LC}} = 400$ m; (b) $L_{\text{LC}} = 600$ m; (c) $L_{\text{LC}} = 800$ m; (d) $L_{\text{LC}} = 1000$ m

Fig. 7. Heat map of speed vs. P_{CACC} and P_{off} : (a) $L_{\text{LC}} = 400$ m; (b) $L_{\text{LC}} = 600$ m; (c) $L_{\text{LC}} = 800$ m; (d) $L_{\text{LC}} = 1000$ m.

容易造成车速急速下降, 根据冲击波理论, 局部小范围的拥堵会快速演化为瓶颈上游大范围拥堵, 难以消散. 对比图 7 (d) 和图 7 (a), 增大换道区域长度能够有效缓解集中换道压力, 在保障安全换道间距选择更优的前提下, 显著提高了抵抗强制换道所导致的系统不稳定的能力.

当 $P_{\text{off}} = 0.15$, $P_{\text{CACC}} = 0.5$, $R = 200$ m, $\lambda = 0.5$ 时, 图 8 和图 9 ($P_{\text{main}} = 0.6$) 分别定性和定量地展示了换道区域长度对不同车道内速度的影

响. 以中间车道为例, 当主线车辆产生比例较低时 (图 8 (a1)—(d1)), 下匝道瓶颈路段上游易出现局部拥堵, 但振荡波传播距离和时间有限, 随着换道区域长度的增加, 拥堵振荡波逐渐减弱直至消失. 值得注意的是, 拥堵振荡波影响的降速范围随着换道区域长度的增加呈现缩小趋势. 当车辆产生比例达到 0.8 时, 增加换道区域长度能够显著抑制拥堵振荡波的产生及其传播, 但无法完全消除, 如图 8 (a3)—(d3) 所示, 局部降速或拥堵始终会出现在

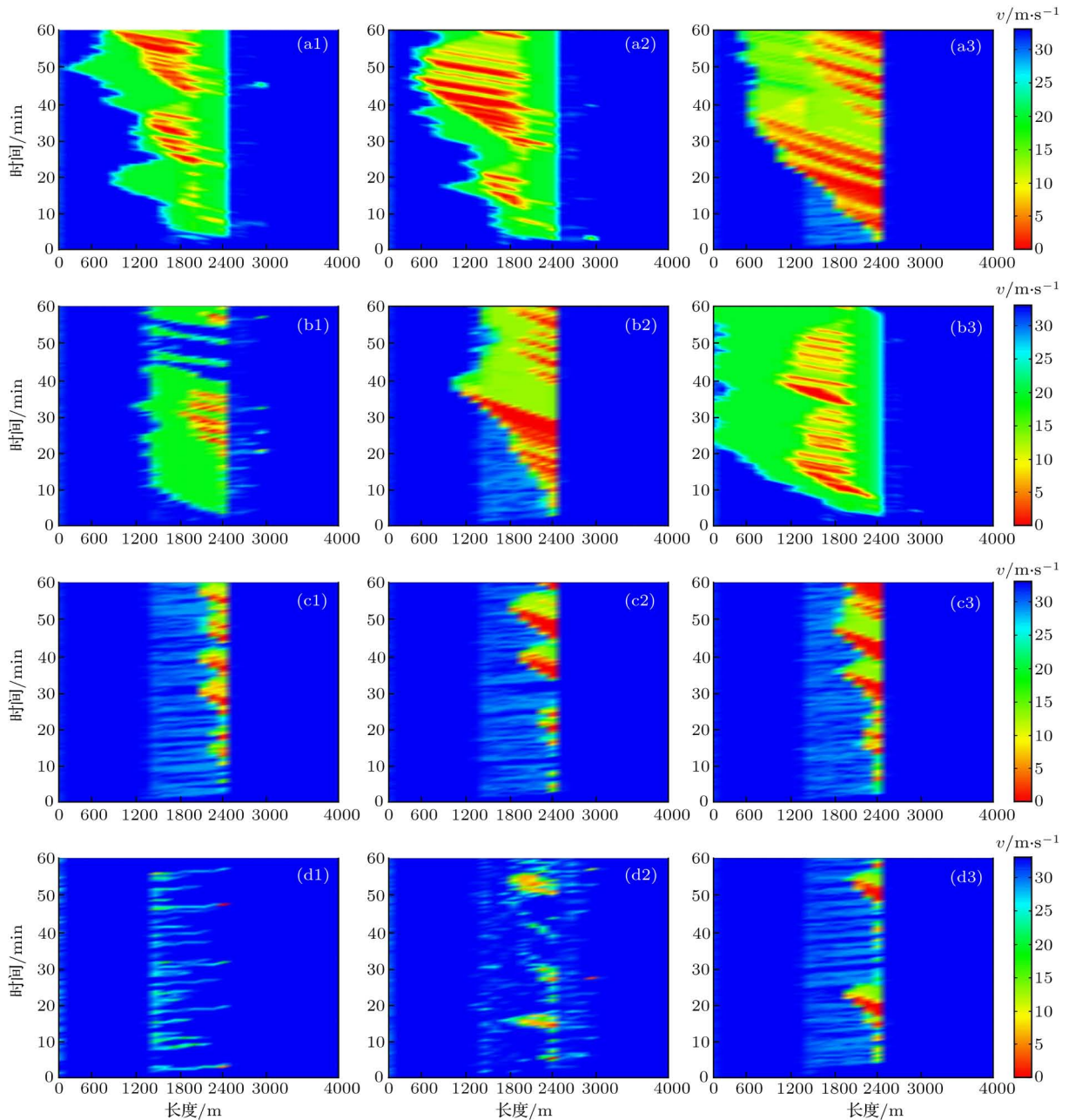


图 8 速度随 L_{LC} 和 P_{main} 变化的热力图 (a) $L_{\text{LC}} = 400$ m; (b) $L_{\text{LC}} = 600$ m; (c) $L_{\text{LC}} = 800$ m; (d) $L_{\text{LC}} = 1000$ m; (a1)—(d1) $P_{\text{main}} = 0.4$; (a2)—(d2) $P_{\text{main}} = 0.6$; (a3)—(d3) $P_{\text{main}} = 0.8$

Fig. 8. Heat map of speed vs. L_{LC} and P_{main} : (a) $L_{\text{LC}} = 400$ m; (b) $L_{\text{LC}} = 600$ m; (c) $L_{\text{LC}} = 800$ m; (d) $L_{\text{LC}} = 1000$ m; (a1)—(d1) $P_{\text{main}} = 0.4$; (a2)—(d2) $P_{\text{main}} = 0.6$; (a3)—(d3) $P_{\text{main}} = 0.8$.

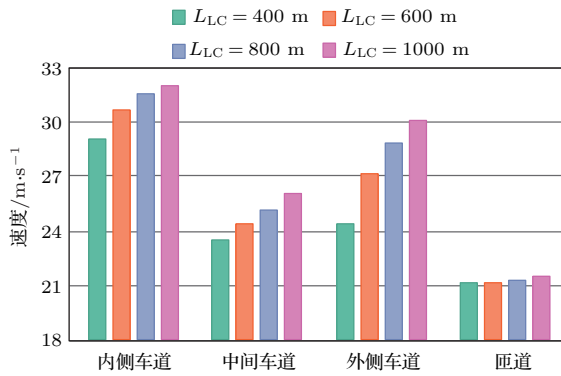


图9 换道区域长度对不同车道内速度的影响

Fig. 9. Influence of lane-changing length on speed in different lanes.

换道区域内, 这是换道行为无法避免的现象. 图9将系统四车道的平均速度量化, 可以看出, 内侧车道速度水平最高, 外侧车道次之, 中间车道速度最低, 且外侧两车道的车辆平均运行速度显著低于内侧车道. 随着换道区域长度的增加, 主线三车道的速度显著提高, 而换道区域长度对匝道速度的影响并不明显.

3.4 换道冒险程度对下匝道瓶颈路段交通流的影响

当 $P_{main} = 0.6$, $P_{off} = 0.15$, $L_{LC} = 400$ m, $R = 200$ m 时, 不同换道冒险程度和 CACC 车辆混入率下的下匝道瓶颈路段上游 [2000, 2500] m 区域内时空斑图如图 10 所示. 从车头时距角度分析, 车辆在拥堵未产生区域内的车头间距保持稳定; 在拥堵影响范围内车头间距较小, 排队严重, 冲击波往上游传播. 随着换道冒险程度的增加, 车辆换道时所选间隙减小, 安全的目标间隙出现概率增大, 换道对交通系统产生的消极影响降低, 在斑图上表现为拥堵范围减小, 拥堵时的车头间距稳定且接近畅通时段 (图 4 (a4)–(d4)). 以 $\lambda = 0.33$ 为例, 如图 4 (a2)–(d2) 所示, 随着 CACC 车辆混入率的增大, 在 $P_{CACC} \leq 0.5$ 时, 受到 CACC 退化成 ACC 影响, 在区域末端出现车辆减速慢行和排队积压现象, 车辆轨迹显示此时冲击波沿车辆行进的反方向

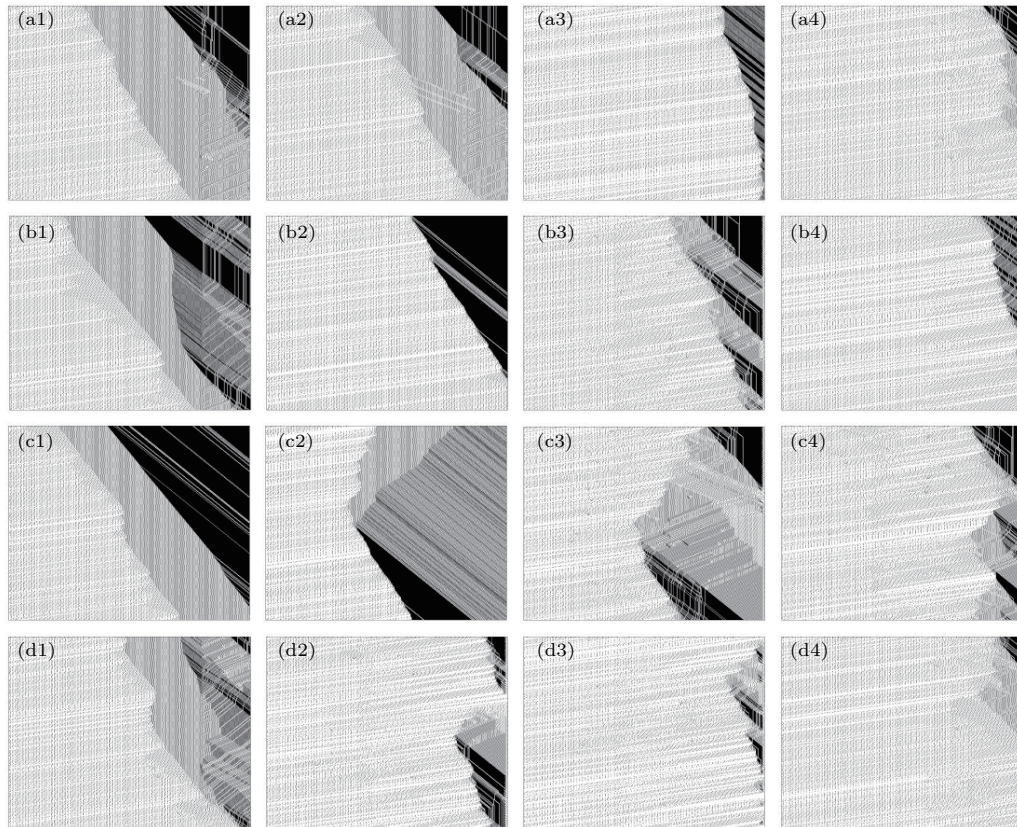


图 10 不同换道冒险程度下的中间车道分流影响区时空斑图 (a) $P_{CACC} = 0$; (b) $P_{CACC} = 0.25$; (c) $P_{CACC} = 0.5$; (d) $P_{CACC} = 0.75$; (a1)–(d1) $\lambda = 0$; (a2)–(d2) $\lambda = 0.33$; (a3)–(d3) $\lambda = 0.67$; (a4)–(d4) $\lambda = 1$

Fig. 10. Temporal-spatial pattern of different levels of lane-changing risk in center lane at diverge influence area: (a) $P_{CACC} = 0$; (b) $P_{CACC} = 0.25$; (c) $P_{CACC} = 0.5$; (d) $P_{CACC} = 0.75$; (a1)–(d1) $\lambda = 0$; (a2)–(d2) $\lambda = 0.33$; (a3)–(d3) $\lambda = 0.67$; (a4)–(d4) $\lambda = 1$.

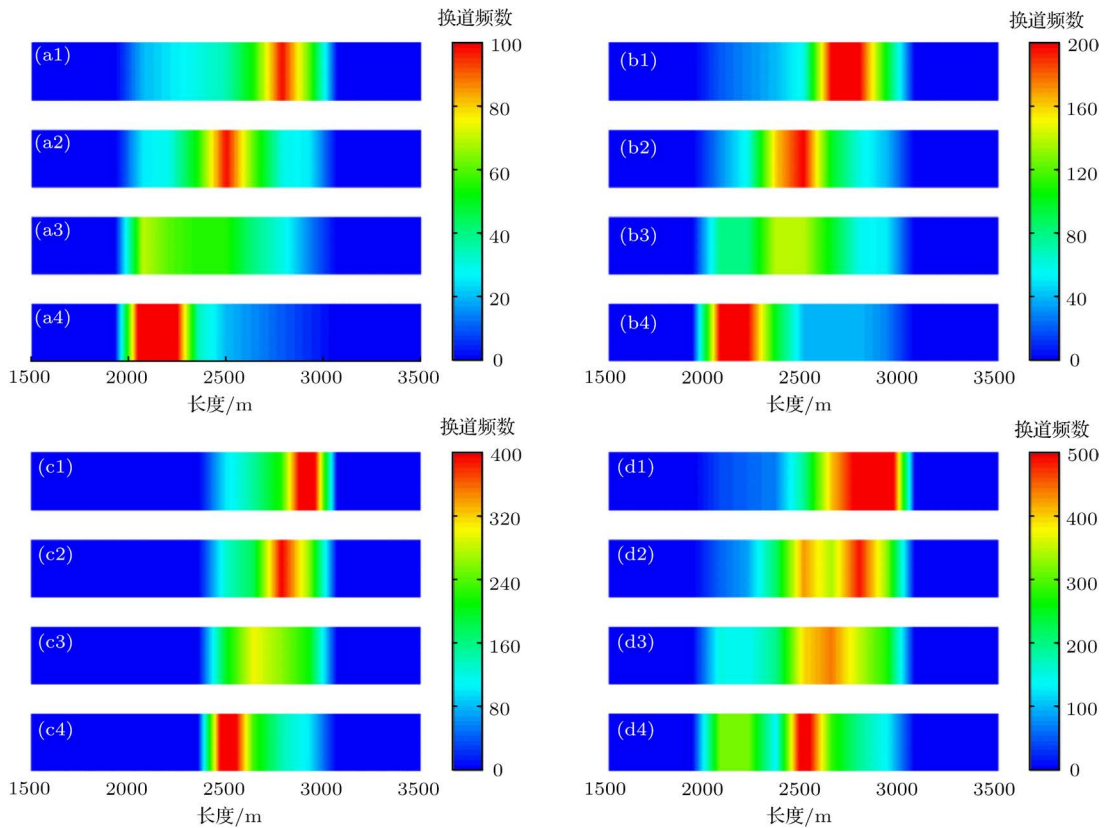


图 11 换道冒险程度对主线交通流的影响 (a) 内侧车道; (b) 中间车道; (c) 外侧车道; (d) 主线断面; (a1)—(d1) $\lambda = 0$; (a2)—(d2) $\lambda = 0.33$; (a3)—(d3) $\lambda = 0.67$; (a4)—(d4) $\lambda = 1$
 Fig. 11. Influence of lane-changing risk on main road traffic flow: (a) median lane; (b) center lane; (c) shoulder lane; (d) mainline section; (a1)—(d1) $\lambda = 0$; (a2)—(d2) $\lambda = 0.33$; (a3)—(d3) $\lambda = 0.67$; (a4)—(d4) $\lambda = 1$.

传播, 拥堵范围进一步扩大, 同时系统稳定性减弱, 车辆降速明显, 拥堵程度加重, 交通系统呈恶化态势. 当 CACC 占据主导, $P_{CACC} > 0.5$ 时, CACC 车辆跟车时减小车头时距, 换道时优选安全间隙, 降低对主线交通的消极影响, 使得该瓶颈路段整体运行水平较高. 这也与前述 3.1 节结论保持了一致.

图 11 详细刻画了不同换道冒险程度下不同车道的换道频数分布 ($P_{main} = 0.6, P_{off} = 0.15, P_{CACC} = 0.5; L_{LC} = 400 \text{ m}, R = 200 \text{ m}$). 由于下匝道车辆均匀分布, 每条车道在不同换道冒险程度下的换道总频数相同, 主线断面、外侧车道、中间车道分别 6 倍、3 倍、2 倍于内侧车道. 对比相同车道发现, 随着 λ 的增大, 主线三车道的换道集中区域均向上游移动, 意味着车辆换道时冒险程度越大, 选择对应换道间隙越容易, 换道完成时间也随之缩短. 当 $\lambda = 1$ 时, 换道频数分布最为均匀, 已经不存在集中区域 (图 11 (a1)—(a4)), 一方面说明直行车辆能够快速有效地向内侧变道, 减小对下匝道车辆的干扰; 另一方面, 下匝道车辆强制换道过程中选

代选择最优间隙次数较少, 减速寻找最优换道间隙的时间较短, 提高了运行效率. 同样地, 主线断面的换道频数统计显示, 随着 λ 的增大, 换道频数分布趋于平均, 避免局部拥堵恶化成大范围拥堵的同时, 也能降低由速度骤降导致的撞车事故风险.

4 结 论

应用 MCD 跟车规则和 PATH 实车实验跟驰模型仿真车辆纵向运动, 并基于手动驾驶汽车和智能车的特性, 建立了自由换道和强制换道模型, 研究混入智能车的下匝道瓶颈路段交通流运行情况. 通过数值仿真, 探索主线车辆产生概率、下匝道车辆比例、CACC 车辆混入率、车辆感知范围、换道区域长度以及换道冒险程度对交通流的影响, 得出如下结论: 1) 当 CACC 车辆增多时, CACC 退化为 ACC, 增加系统不稳定性, 导致下匝道交通系统在 CACC 混入率达到 0.5 之前不断恶化, 超过 0.5 之后开始提升系统主线运行效率, 但对匝道影响较小.

2) 本文混合交通流模型对车辆感知范围、换道区域长度和换道冒险程度均较为敏感, 车辆感知范围越大, 换道区域长度越长, 换道冒险程度越深, 可以提高混合交通系统的运行效率, 对延缓拥挤产生和加快拥堵消散具有积极作用.

未来的智能车发展将迈向自动驾驶汽车, 由先进传感器组成的车辆感知系统使得人-车-路环境信息交互变得更加快捷, 数据来源更加丰富, 辅助跟车和换道的算法将会融入更多因素, 本文仅定位现阶段车辆工程和信息技术发展, 面向全自动驾驶汽车的建模与仿真、实地实验操作有待进一步研究.

参考文献

- [1] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
- [2] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [3] Jin S, Wang D H, Tao P F, Li P F 2010 *Physica A* **389** 4654
- [4] 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]
- [5] Gupta A K, Redhu P 2013 *Physica A* **392** 5622
- [6] Lei Y, Zhong K S, Tong L 2014 *Phys. Lett. A* **378** 348
- [7] Zhou T, Sun D H, Kang Y R, Li H M, Tian C 2014 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **19** 3820
- [8] Sun D H, Zhang M, Tian C 2014 *Mod. Phys. Lett. B* **28** 1450091
- [9] Sun D H, Kang Y R, Li H M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154503 (in Chinese) [孙棣华, 康义容, 李华民 2015 物理学报 **64** 154503]
- [10] Werf J V, Shladover S, Miller M, Kourjanskaia N 2002 *Transp. Res. Rec.* **1800** 78
- [11] Davis L C 2004 *Phys. Rev. E* **69** 066110
- [12] Xiao L Y, Gao F 2011 *IEEE Trans. Intell. Transp.* **12** 1184
- [13] Mark V, Schleicher S, Gelau C 2011 *Accident Anal. Prev.* **43** 1134
- [14] Davis L C 2012 *Phys. Lett. A* **376** 2658
- [15] Siebert F W, Oehl M, Pfister H R 2014 *Trans. Res. F* **25** 65
- [16] Zhao D B, Hu Z H, Xia Z P, Alippi C, Zhu Y H, Wang D 2014 *Neurocomputing* **125** 57
- [17] Yuan Y M, Jiang R, Hu M B, Wu Q S, Wang R 2009 *Physica A* **388** 2483
- [18] Milanés V, Villagrà J, Pérez J, González C 2012 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **59** 620
- [19] Milanés V, Shladover S E, Spring J, Nowakowski C, Kawazoe H, Nakamura M 2014 *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **15** 296
- [20] Jin I G, Orosz G 2014 *Transp. Res. C* **46** 46
- [21] Tang T Q, Yu Q, Yang S C, Ding C 2015 *Mod. Phys. Lett. B* **29** 1550157
- [22] Tang T Q, Chen L, Yang S C, Shang H Y 2015 *Physica A* **430** 148
- [23] Ge H X, Zheng P J, Wang W, Cheng R J 2015 *Physica A* **433** 274
- [24] Ge H X, Cheng R J, Li Z P 2008 *Physica A* **387** 5239
- [25] Tang T Q, Li J G, Yang S C, Shang H Y 2015 *Physica A* **419** 293
- [26] Hua X D, Wang W, Wang H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 010502 (in Chinese) [华雪东, 王炜, 王昊 2016 物理学报 **65** 010502]
- [27] Hua X D, Wang W, Wang H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 084503 (in Chinese) [华雪东, 王炜, 王昊 2016 物理学报 **65** 084503]
- [28] Sau J, Monteil J, Billot R, Faouzi N E E 2014 *Transp. B: Transp. Dyn.* **2** 60
- [29] van Arem B, van Driel C J G, Visser R 2006 *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **7** 429
- [30] Qin Y Y, Wang H, Wang W, Wan Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 094502 (in Chinese) [秦严严, 王昊, 王炜, 万千 2017 物理学报 **66** 094502]
- [31] Tang T Q, Xu K W, Yang S C, Ding C 2016 *Physica A* **441** 221
- [32] Yu S, Shi Z 2015 *Physica A* **428** 206
- [33] Wang M, Daamen W, Hoogendoorn S P, van Arem B 2016 *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **17** 1459
- [34] Jerath K, Brennan S N 2012 *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **13** 1782
- [35] Shladover S, Su D, Lu X Y 2012 *Transp. Res. Rec.* **2324** 63
- [36] Milanés V, Shladover S E 2014 *Transp. Res. C* **48** 285
- [37] Nagel K, Wolf D, Wagner P 1996 *Phys. Rev. E* **58** 1425
- [38] Kesting A, Treiber M, Schonhof M, Helbing D 2008 *Transp. Res. C* **16** 668
- [39] Hua X D, Wang W, Wang H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084502 (in Chinese) [华雪东, 王炜, 王昊 2011 物理学报 **60** 084502]
- [40] Wei L Y, Wang Z L, Wu R H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044501 (in Chinese) [魏丽英, 王志龙, 吴荣华 2014 物理学报 **63** 044501]
- [41] Zhang W H, Yan R, Feng Z X, Wang K 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 064501 (in Chinese) [张卫华, 颜冉, 冯忠祥, 王锟 2016 物理学报 **65** 064501]
- [42] Zhu W X, Zhang H M 2017 *Physica A* **496** 274
- [43] Zhu W X, Zhang J Y 2017 *Physica A* **467** 107
- [44] Tang T Q, Huang H J, Shang H Y 2017 *Physica A* **468** 322
- [45] Tang T Q, Wang T, Chen L, Shang H Y 2017 *Physica A* **486** 720
- [46] Zhang J, Tang T Q, Yu S W 2018 *Physica A* **492** 1831
- [47] Jiang R, Wu Q S 2003 *J. Phys. A: Math. Gen.* **36** 381
- [48] Jiang R, Wu Q S 2005 *Eur. Phys. J. B* **46** 581
- [49] Jiang R, Wu Q S 2006 *Phys. Lett. A* **359** 99
- [50] Jiang R, Hu M B, Jia B, Wang R, Wu Q S 2007 *Eur. Phys. J. B* **58** 197
- [51] Naus G J, Vugts R P, Ploeg J, van de Molengraft M J, Steinbuch M 2010 *IEEE Trans. Veh. Technol.* **59** 4268
- [52] Dong C Y 2016 *M. S. Thesis* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [董长印 2016 硕士学位论文 (南京: 东南大学)]

- [53] Kang R, Yang K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 238901 (in Chinese) [康瑞, 杨凯 2013 物理学报 **62** 238901]
 [54] Liu X H, Ko H T, Guo M M, Wu Z 2016 *Chin. Phys. B* **25** 048901
 [55] Zhang Y, Ioannou P A 2017 *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **18** 1812
 [56] Gorter M 2015 *M. S. Thesis* (Delft: Delft University of Technology)

Hybrid traffic flow model for intelligent vehicles exiting to off-ramp*

Dong Chang-Yin¹⁾²⁾ Wang Hao^{1)2)†} Wang Wei¹⁾²⁾ Li Ye¹⁾²⁾ Hua Xue-Dong¹⁾²⁾³⁾

1) (*Jiangsu Key Laboratory of Urban Intelligent Traffic System, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

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

3) (*School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

(Received 27 December 2017; revised manuscript received 14 May 2018)

Abstract

With the rapid development of vehicular technology, hi-tech manufacturing facilities are equipped in intelligent vehicles to improve road capacity and traffic safety. However, freeway diverge segment has significant influence on current traffic flow, and could affect the heterogeneous traffic flow consisting of manual and intelligent vehicles. The primary objective of this study is to evaluate how intelligent vehicles affect traffic flow at an off-ramp bottleneck.

In order to depict the car-following dynamics of manual vehicles, the modified comfortable model, one of the most classic cellular automata models, is employed to distinguish intelligent vehicles. In this paper, intelligent vehicles consist of adaptive cruise control (ACC) vehicles cooperative adaptive cruise control (CACC) vehicles. The ACC and CACC model are proposed by partners for advanced transportation technology (PATH), which are validated by real experimental data. Besides, vehicles equipped with CACC will degrade ACC vehicle if the leading vehicle is driven manually. From the perspective of vehicle's lateral movement, two novel lane-changing models, including the discretionary lane-change (DLC) model and mandatory lane-change (MLC) model, are developed to model the future behaviors of intelligent vehicles. A risk factor λ is introduced into the DLC model to distinguish vehicles from conventional ones. Based on environment perception technology, a five-step MLC decision-making model is designed specifically for intelligent vehicles exiting to off-ramp. It is comprised of environment perception, safe gap computation, measured gap ranking, measured gap classification and lane-changing gap selection. Based on the proposed hybrid traffic flow model, numerical simulations are conducted to study the influences of intelligent vehicles on the traffic flow near an off-ramp. Apart from the market penetration of intelligent vehicles, parameters considered in this paper include the demands of mainlines and off-ramp, range of environment perception, length of lane-changing area, and level of lane-changing risk.

Analytical studies and simulation results are as follows. 1) The integration of car-following model and lane-changing model for the off-ramp system enables vehicles to have reasonable dynamic characteristics. 2) The capacity ascends to the peak after an initial decrease as CACC vehicle penetration increases. The maximum capacity obtained in 100% CACC vehicle scenario is improved by over 50%, compared with that in 50% CACC penetration scenario. 3) Enlarging the ranges of environment perception and lane-changing areas, and enhancing the lane-changing risk can significantly dissipate congestion upstream of the off-ramp and improve the efficiency of mainlines. However, they have little influence on traffic flow at off-ramp. 4) The worst performance of the system occurs in the scenario of 50% CACC penetration, where deterioration caused by degraded ACC vehicles suggests that enough patience and public confidence should be paid for the development of intelligent vehicles.

Keywords: intelligent vehicle, lane-changing model, freeway diverge segment, adaptive cruise control

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.67.20172752

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51478113, 51508122), the Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds, China (Grant No. 1701082B), and the Scientific Research Foundation of Graduate School of Southeast University, China (Grant No. YBJJ1734).

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