

混合 ACC 车辆与人工驾驶车辆的交通流数值模拟

陈广宇¹, 祝会兵^{1*}, 范悦悦²

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211;

2. 美国加州大学戴维斯分校 土木和环境工程系, 加利福尼亚 戴维斯 95616)

摘要: 针对自动驾驶汽车与人工驾驶汽车混合通行的新型交通流模式, 基于元胞自动机交通流模型, 分别建立了人工驾驶汽车以及装有自适应巡航系统(ACC)车辆的运动规则, 进而提出了混合 ACC 车辆与人工驾驶汽车的交通流模型. 基于 ACC 车辆的常车头时距策略, 分析了车头时距取值对交通流的影响, 经过与实测数据比较, 推荐了合适的车头时距值. 研究结果显示, 新型的混合交通流中依然存在自由流、同步流及宽幅运动阻塞, 但是单纯 ACC 车辆交通流在中高密度区域则会出现均匀流动现象. 车辆时空演化图显示 ACC 车辆的出现有利于提高交通流的整体流量、有效减少车辆集簇. 研究结果可以为新型交通环境下的交通工程规划和建设提供理论指导.

关键词: ACC 车辆; 元胞自动机; 交通流模型; 非线性特征

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 02-0101-07

人工驾驶汽车的交通流理论研究已经历了半个多世纪, 建立了众多的交通流模型^[1-6], 为人们认识纷繁复杂的交通现象提供了帮助. 近年来, 汽车自动驾驶技术的发展, 尤其是自适应巡航系统(ACC)这一驾驶员辅助技术的出现, 使交通流面临巨大的变化, 有关自动驾驶汽车交通流特性的研究也引起了人们广泛的关注^[7-17].

驾驶员辅助的自动驾驶汽车(ACC 车辆)是自动化程度最低的自动驾驶汽车, 其特点是车辆配有自适应巡航系统, 许多高档车辆已具备这一功能. ACC 车辆消除了人工驾驶汽车驾驶员的反应延误, 且有加速快、行驶安全等特点. 在自动驾驶汽车的发展过程中, 总会经历自动驾驶汽车与人工驾驶汽车混合行驶的阶段, 此时, 自动驾驶汽车一些比人类司机更安全的行车习惯, 往往反而成为人工驾驶汽车与其发生碰撞的直接原因. 自动驾驶汽车与人工驾驶汽车之间存在着相互适应与协调的问题, 这也成为交通流研究的热点问题.

目前对 ACC 车辆的建模一般基于它的“常车头时距”的特点, 该策略能使 ACC 车辆自动保持

与前车的理想间距, 使交通系统更加高效、稳定和安全^[7]. Davis 利用车辆跟驰模型模拟了 ACC 车辆与人工驾驶车辆组成的混合交通流在上匝道汇流区域的交通现象^[8], 分析了存在 ACC 车辆时交通流的局部稳定性^[9], 并提出拥有互联信息的 ACC 车辆可减少道路缩减处车辆通过瓶颈的时间, 从而缓解交通拥堵^[10]. 而 Ioannou 等^[11]也利用车辆跟驰模型分析了 ACC 车辆对邻道车辆换道进入行为的敏感性, 发现 ACC 车辆的平滑换道方式能有效减少对交通流的影响. 国内姜锐等^[12]率先提出一个有 ACC 车辆参与的单车道元胞自动机模型, 但模型中保留了模拟驾驶员心理变化的随机减速步, 使得 ACC 车辆的速度出现波动. 谢东繁等^[13]利用车辆跟驰模型研究了 ACC 车辆与传统车辆混合行驶时交通流的基本图特征. 袁耀明等^[14]采用混合建模的方法研究了 ACC 车辆和人工驾驶汽车混合交通流的同步流和相变的特性, 即利用姜锐等^[6]提出的 MCD 元胞自动机模型建立人工驾驶汽车的运行规则, 利用车辆跟驰模型建立 ACC 车辆的前进规则. 华雪东等^[15]也采用混合建模的方法提出了

收稿日期: 2017-09-19.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11372147); 宁波大学王宽诚基金.

第一作者: 陈广宇(1992-), 男, 浙江湖州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 交通流动力学. E-mail: 510832305@qq.com

*通信作者: 祝会兵(1966-), 女, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 交通流动力学. E-mail: zhuhuibing@nbu.edu.cn

考虑 ACC 车辆影响的上匝道区域混合交通流模型,研究了 ACC 车辆对上匝道交通系统的影响.

根据车辆的性能分别采用不同的模型是一种巧妙的处理办法,但在一个整体的交通系统中,分别采用两种模型来模拟两类车辆的运动,难免在计算过程中产生数据交换的不协调.

虽然有关 ACC 车辆的建模工作已有不少进展,但有些结果却并不一致,有人认为加入 ACC 车辆后车间距变大^[16],也有的认为 ACC 车辆比人工驾驶车辆更激进^[17],所以关于自动驾驶汽车的交通流建模还有待进一步深入.自动驾驶汽车技术的日渐成熟,车辆运动和信息接收等方面的参数逐渐清晰,为建立符合实际情况的自动驾驶和人工驾驶汽车混合的交通流模型提供了有利条件.

本文统一采用元胞自动机模型,建立 ACC 车辆与人工驾驶汽车混合通行的交通流模型,研究自动驾驶汽车时代交通流的动力学特征.

1 模型的提出

1.1 人工驾驶汽车的运动规则

姜锐等^[6]提出的单车道 MCD 元胞自动机模型能较真实、全面地模拟实际交通,展现拥堵交通的轻同步流现象.因此,选择 MCD 模型作为人工驾驶汽车运动规则的基础,并做两点修改:一是在规则(5)中,认为只有当前速度小于前时刻速度时才是刹车状态;另外, MCD 模型中车辆起步时的加速度与行进时的加速度取值不同,并且起步时的加速度取 1,行进时的加速度取 2,每个元胞长度为 1.5 m,那么对应的实际加速度分别为 1.5 和 3.0 m·s⁻²,但是车辆加速度的实测结果表明,起步时的加速度应该大于行进中的加速度值^[18],至少不应小于行进时的加速度.

取每个元胞长度为 0.1 m,则人工驾驶汽车的运行规则表达如下:

(1)确定随机慢化参数.

$$p_n(t+1) = p_n(v_n(t), b_{n+1}(t), t_h, t_s),$$

$$p(v_n(t), b_{n+1}(t), t_h, t_s) = \begin{cases} p_b, & b_{n+1}(t) = 1, t_h < t_s, \\ p_0, & v_n(t) = 0, t_{st} > t_c, \\ p_d, & \text{其他}, \end{cases}$$

初始时刻: $b_n(t+1) = 0$,

式中, p 是随机慢化参数; $v_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时

刻的速度; $b_{n+1}(t)$ 为前车在 t 时刻的刹车灯状态,取值“0”和“1”,当 $b_{n+1}(t) = 1$ 时,刹车灯亮,当 $b_{n+1}(t) = 0$ 时,刹车灯灭; p_b, p_0 及 p_d 为概率参数, $p_b = 0.94$, $p_0 = 0.5$, $p_d = 0.1$ ^[5]; t_h 表示与前车的实际车头时距, $t_h = d_n(t) / v_n(t)$,其中 $d_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻与前车的车间距; t_s 表示由速度确定的刹车灯可视区域, $t_s = \min(v_n(t), h)$; t_{st} 表示车辆停止时间, t_c 取 60, 对应于 60 s.

(2)车辆加速过程. (a)当 $b_{n+1}(t) = 0$ 或 $t_h \geq t_s$ 时: $v_n(t+1) = \min(v_n(t) + a_1, V_{\max})$; (b)其他: $v_n(t+1) = v_n(t)$. 这里, a_1 是加速度.

(3)确定性刹车过程. $v_n(t+1) = \min(d_n^{\text{eff}}, v_n(t+1))$, 式中, $d_n^{\text{eff}} = d_n + \max(v_{\text{anti}} - d_{\text{safe}}, 0)$ 为预期车间距; $v_{\text{anti}} = \min(d_{n+1}, v_{n+1})$ 为前车的预期车速; d_{safe} 为安全车距, 这里取 70, 对应实际长度 7 m.

(4)随机慢化过程. 以概率 p 随机慢化: $v_n(t+1) = \min(v_n(t+1) - a_2, 0)$. 这里, a_2 是减速度.

(5)更新刹车灯状态参数.

$$b_n(t+1) = \begin{cases} 0, & v_n(t+1) \geq v_n(t); \\ 1, & v_n(t+1) < v_n(t). \end{cases}$$

(6)更新车辆停止时间参数 t_{st} .

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

(7)位置更新. $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$.

1.2 ACC 车辆的运动规则

为了保证 ACC 车辆的行驶安全,必须有足够的车头时距以避免车辆追尾.这里采用了 Yanakiev 等^[19]提出的基于常车头时距的变间距策略,即 CTH 策略,两车之间的期望车头间距表达为:

$$\hat{d} = h_l \cdot \hat{v} + \hat{d}_0, \quad (1)$$

式中, $\hat{d}$ 是 ACC 车辆与前车的期望车间距; h_l 表示固定不变的车头时距; $\hat{v}$ 表示 ACC 车辆的当前速度; $\hat{d}_0$ 表示与前车的最小安全距离.各个参数之间的关系如图 1 所示.

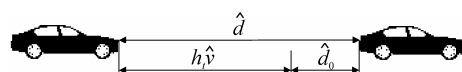


图 1 ACC 车辆行进中与前车的关系示意图

前车有可能是 ACC 车辆,也可能是人工驾驶汽车.在 CTH 策略中,虽然车头时距 h_l 是定常的,但 $\hat{d}$ 会随着当前车速 $\hat{v}$ 的不同而变化,当车速 $\hat{v}$ 较大时,期望车间距 $\hat{d}$ 也会随之增大,保证前车突然

刹车时本车也有足够距离进行紧急刹车; 当本车车速较低时, 期望车间距也较小, 保证了车辆能够正常跟车的同时, 提高了道路通行能力.

基于 DHD 元胞自动机模型^[20], 忽略随机慢化过程, ACC 车辆运动规则表达如下:

$$(1) \text{加速: } \hat{v}_n(\hat{t}+1) = \min(\hat{v}_n(\hat{t}) + \hat{a}, \hat{v}_{\max}).$$

$$(2) \text{减速: } \hat{v}_n(\hat{t}+1) = \min(\hat{v}_n(\hat{t}), \hat{d}_n(\hat{t}) + \hat{v}_{\text{prep}}^e - \hat{d}).$$

$$(3) \text{位置更新: } \hat{x}_n(\hat{t}+1) = \hat{x}_n(\hat{t}) + \hat{v}_n(\hat{t}+1).$$

式中, $\hat{t}$ 表示时间; $\hat{a}$ 表示加速度; $\hat{v}_{\max}$ 表示最大速度; $\hat{v}_{\text{prep}}^e$ 表示前车的预期车速. 这样, 在减速步中, 既考虑了车辆之间的动态车间距, 也保证了 ACC 车辆必须满足的最小间距.

1.3 混合 ACC 车辆与人工驾驶汽车的交通流模型

基于上面建立的车辆运动规则, 我们提出了单车道混合交通流的元胞自动机模型.

传统汽车的时间步长 Δt 取为 1 s, 相当于人的正常反应时间; 而 ACC 车辆通过互联信息技术和智能系统进行路况信息的收集与处理, 它对于外界的反应比人更加敏捷. 因此, 在模型中 ACC 车辆的时间步长设定为 0.1 s. 那么在人工驾驶汽车 1 个 Δt 内, ACC 车辆完成 10 次速度和位置更新. ACC 车辆的这个更新时间称为子时间步长 $\Delta \hat{t}$, 即: $\Delta t = 10 \cdot \Delta \hat{t}$.

当 ACC 车辆前方有人工驾驶汽车时, 认为人工驾驶汽车的同一个 Δt 内速度保持不变, 通过线性插值获得其各个 $\Delta \hat{t}$ 时的实时位置, 作为 ACC 车辆感知前车距离的依据. 反过来, 当人工驾驶汽车前方有 ACC 车辆时, 为了保证人工驾驶汽车运动状态的更新, ACC 车辆需要有相应的刹车灯参数 b_n , 其赋值规则与改进的 MCD 模型第 5 条一致, 每间隔 Δt 时刻把刹车灯参数提供给人工驾驶汽车. 同时, 采用 0.1 m 长的元胞格子, 以便细致模拟车辆的运动. 车辆长度取为 7 m, 占 70 个元胞格子.

当 ACC 车辆比例为 0 时, 混合交通流模型即为改进的 MCD 元胞自动机模型. 当交通流的组成全部为 ACC 车辆时, 该混合模型即为基于 CTH 策略的 ACC 车辆元胞自动机模型.

2 数值模拟和分析

利用上述模型对单车道交通流开展数值模拟, 采用周期性边界条件. 道路长度取为 $L=35\,000$, 对

应于真实的道路长度 3 500 m. 考虑到城市快速路的限速, 取最大车速为 $V_{\max} = 220$, 对应实际车速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车辆的速度就在 0 与 $V_{\max}$ 之间取值. 车辆的初始位置和速度都随机分布.

2.1 人工驾驶汽车交通流的模拟与分析

首先绘制人工驾驶汽车交通流的流量—密度关系图(图 2). 先设定车道上的总车辆数, 也就是确定了道路的总体密度. 假设在车道某处设有一个探测器, 记录了 1 min 内经过该处的车辆数 N 和每辆车的速度, 那么就可以计算得到每小时平均流量 $J = 60 \cdot N$ 、车辆平均速度 v 以及局部密度 $\rho = J / v$, 这样就可以得到流量—密度关系图上的一个点. 在计算过程中, 去掉开始运行的 10 000 个时间步来消除暂态影响, 记录随后运行的 12 000 个时间步的数据, 按照上述方法每 60 个时间步数据进行平均得到图中的一个点, 则共得到 200 个点. 改变车辆总数, 重复上述运算, 即可绘制出流量—密度关系图上更多的点, 结果如图 2(a)所示.

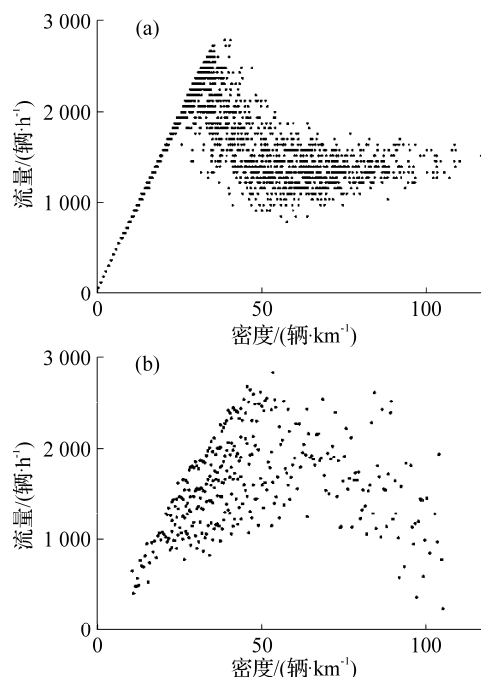


图2 修正的 MCD 模型得到的流量—密度图

图 2(b)是根据郭明旻等人建立的“交通实测视频与数据共享平台”^[21]中上海市延安高架的实测结果通过数据处理得到的流量—密度图^[22], 把数值模拟结果与之进行比较, 发现当车辆的起步加速度与行进加速度均为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 减速度为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时, 流量的最大值与实测结果较为吻合, 即如图 2(a)所

示. 因此, 在以下的数值计算中, 对于人工驾驶汽车, 就取加速度 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 减速度为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. 由于本文中的元胞长度为 0.1 m , 所以无量纲加速度为 30, 减速度为 15.

与 MCD 模型比较, 这里不再区分车辆起步加速度和行进加速度. 比较流量—密度图, 本模型得到的最大流量值比 MCD 模型得到的最大流量值更大些, 与实测值更接近, 但形态基本相同, 在中等密度区域均出现了流量—密度的二维弥散分布的状态而非唯一确定的关系. 这表明可能出现了同步流, 对模拟得到的流量—密度的时间序列进行互协相关系数计算, 公式如下:

$$c_{x,y}(\tau) = \frac{\langle x(t)y(t+\tau) \rangle - \langle x(t) \rangle \langle y(t+\tau) \rangle}{\sqrt{\langle x^2(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2} \sqrt{\langle y^2(t) \rangle - \langle y(t) \rangle^2}}, \quad (2)$$

式中, $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示密度和流量的时间序列; $\langle x(t) \rangle$ 和 $\langle y(t) \rangle$ 分别表示密度和流量时间序列的均值; τ 表示时间间隔, 这里取 0; c 表示互协相关系数, c 值越接近 1, 表示密度与流量的相关性越大, c 值越接近 0, 则表示两者相关性越低. 同步流时的密度、流量就属于相关性较低的情形.

对整体车辆数 N 分别为 80、260 和 440 辆时的互协相关系数进行计算, 结果如图 3 所示.

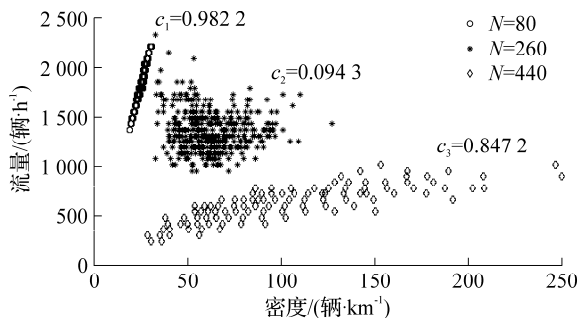


图3 改进后的MCD模型流量—密度关系及互协相关系数

当 N 为 80 和 440 辆时, 互协相关系数分别为 0.9822 和 0.8472, 表明此时的流量—密度时间序列几乎完全相关, 在图中两组数据呈现直线分布和接近直线分布状态, 分别代表了自由流和拥挤交通时的流量与密度的关系. 当整体车辆数 N 为 260 辆时, 互协相关系数为 0.0943, 接近于 0, 表明此时的流量与密度完全不相干, 在图中看到的流量与密度关系呈现二维分布的散点, 表现出同步流时的特征. 表明修改后的 MCD 模型仍然能够再现交通流中的同步流现象.

2.2 ACC 车辆的车头时距分析

根据 CTH 规则, 即公式(1)的描述, 期望车头间距 $\hat{d}$ 的大小与车头时距 h_i 的大小成正比, 因此车头时距 h_i 的不同选择会影响 ACC 车辆与前车的间距, 进而影响道路上所有车辆的行驶状况, 那么, 车头时距 h_i 的变化会产生怎样的影响呢?

当道路上的车辆全部为 ACC 车辆时, 分析车头时距分别为 2, 1.5, 1, 0.5 时平均流量随密度的变化规律, 如图 4 所示, 这里考虑到当前 ACC 车辆多为电动汽车, 加速度比较大, 因此取 $\hat{a} = 40$, 对应于实际加速度 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. 可以看到, 当密度比较小时, 4 种不同的车头时距得到的流量基本相同, 但是当密度大于 $20 \text{ 辆}\cdot\text{km}^{-1}$ 时, 流量随着车头时距的减小而逐渐增大. 这主要是因为车头时距 h_i 减小时, 行驶的 ACC 车辆与前车之间的期望保持的距离缩短, 使得交通流密度有增大的可能, 从而引起流量的增加; 如果密度保持不变, 那么根据 CTH 规则, 在车辆之间距离相同的情况下, 随着车头时距的减小, ACC 车辆的期望车速就要增大, 进而使得交通流量增加. 虽然提高流量有利于疏导交通, 但过小的车头时距会增加车辆碰撞的可能性, 因此, 对于 ACC 车辆, 车头时距 h_i 的合理选择可以保证交通安全并有效利用道路资源.

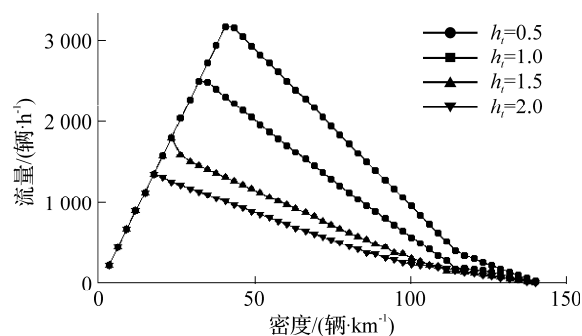


图4 车头时距 h_i 对流量的影响

在文献[23]中, 基于交通流实测数据绘制了各种交通流状态下人工驾驶汽车的车头时距分布图, 其图 10 和图 16 分别展示了在自由流和同步流情况下的车头时距分布图, 发现自由流时大多数车辆在行驶时与前车保持了 1 s 左右的车头时距, 同步流时车头时距也大多在 $1\sim 2 \text{ s}$ 之间. 文献[24]则对搭载 ACC 和 CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) 辅助驾驶系统的汽车进行了实地测试, 结果表明自动驾驶汽车的车头时距主要分布在 $0.6\sim$

2.2 s 之间. 因此, 在之后的模拟中选取 $h_t=1$ s 作为车头时距值.

2.3 ACC 车辆对交通流的影响分析

根据上述混合交通流模型, 得到人工驾驶车辆与 ACC 车辆混合情况下的流量—密度关系, 如图 5 所示, 其中 r 是 ACC 车辆所占的比例.

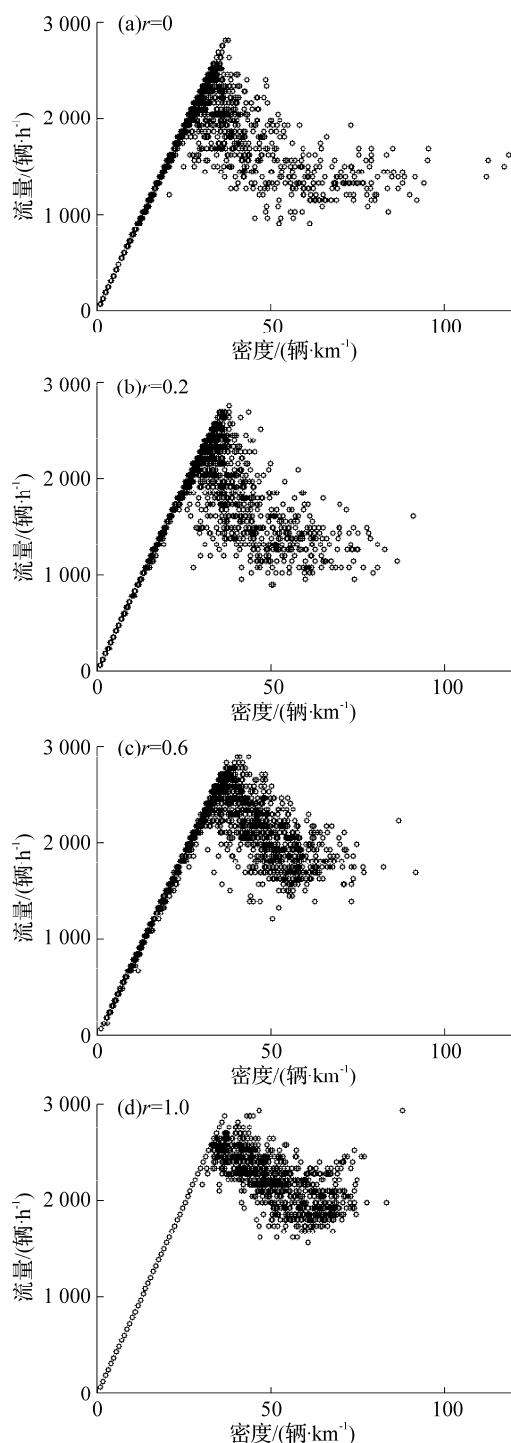


图 5 自动驾驶汽车占不同比例时的流量—密度分布

可以看到, 随着 ACC 车辆比例的增加, 流量能达到的最大值也有所增加, 反映出自动驾驶车辆的引入能够增加交通流的整体流量. 在 $0\sim 25$ 辆· km^{-1} 密度区域, 流量与密度呈线性关系, 说明车辆在该密度区域时表现为自由流状态. 在 30 辆· km^{-1} 密度附近, 流量出现峰值. 在 30 辆· km^{-1} 密度区域之后, 流量—密度图呈现散点分布.

假设 ACC 车辆比例为 0.2, 选取车道整体车辆数分别为 90, 270, 450 辆, 计算 500 组连续 1 min 流量—密度时间序列, 绘制出流量—密度分布以及对应的互协相关系数, 如图 6 所示. 可以看到, 当整体车辆为 90 辆时, 流量与密度的互协相关系数为 0.971 7, 呈现明显的线性分布, 表明流量与密度几乎完全相关, 这时车辆以自由流方式行进, 交通流流量的变化完全由密度的波动所控制, 同时车辆的平均速度几乎为一常数. 在整体车辆为 270 辆时, 流量与密度的相关系数为 0.061 9, 接近于 0, 流量与密度的变化呈现几乎完全不相关状态, 图中展现一些二维分布的点, 说明此时出现了同步流^[5-6]. 当整体车辆为 450 辆时, 局部密度在一个较大的区间内波动, 并且平均速度很低, 相关系数为 0.981 7, 接近于 1, 流量与密度几乎完全相关, 流量变化受密度波动的影响, 符合宽幅运动拥堵状态. 因此混合交通流中也存在着三相交通流, 并且本交通流模型展现了它们.

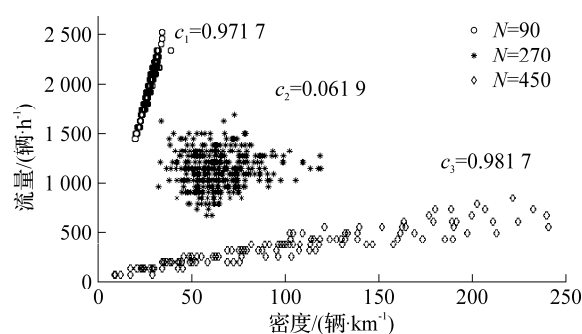


图 6 流量—密度关系及其互协相关系数

但是, 计算结果显示, 当车道上全部为 ACC 车辆时, 没有发现同步流现象, 而是出现一种均匀流动现象, 即所有车辆几乎保持相同的速度和间距行驶. 这是由于 ACC 车辆消除了驾驶员的随机减速习惯, 按照常车头时距策略, 在中高密度区域, 车辆的间距与速度逐渐趋于一致, 流量与密度表现出极强的相关性.

为了深入了解人工驾驶汽车与 ACC 车辆混合行驶时的交通流特征,我们模拟得到了 ACC 车辆不同比例时的车辆时空演化图,如图 7 所示,此时整体密度为 0.25,粗点连成的线表示 ACC 车辆的运动轨迹线,细点连成的线表示人工驾驶汽车的运动轨迹线。可以看到,随着 ACC 车辆比例的增加,车辆的集簇现象慢慢消失,时走时停波逐渐减少,车辆的轨迹线越来越顺直,说明 ACC 车辆越多,道路交通越顺畅。因此,自动驾驶汽车的出现有利于缓解交通拥堵。

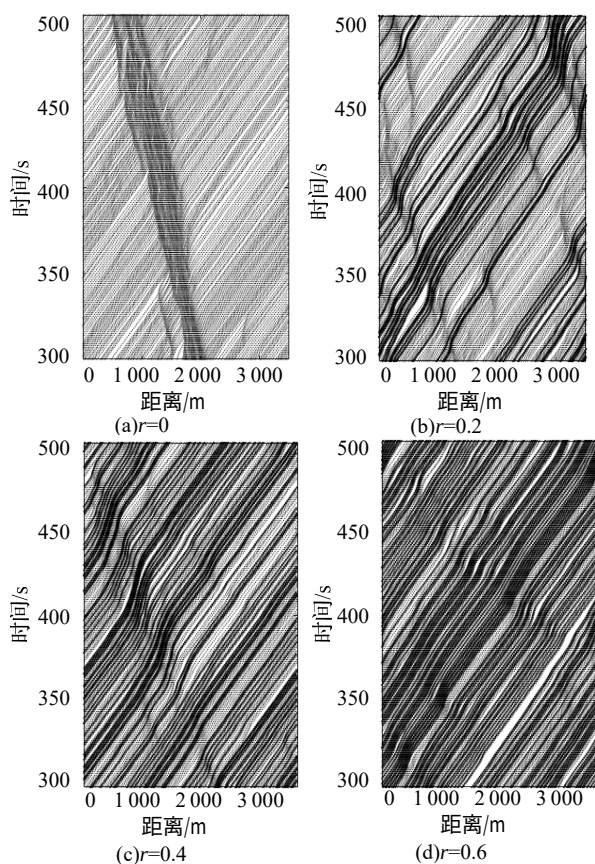


图 7 ACC 车辆占不同比例时的车辆时空演化

3 结论

本文采用统一的元胞自动机模型对混合 ACC 车辆和人工驾驶汽车的交通流进行了研究,根据两种车型对外部信息不同反应速度,采取不同的车辆位置更新的时间步长,通过线性插值等手段实现不同车型之间相关数据的传递,使模型接近实际。基于 ACC 车辆的常车头时距策略,分析了车头时距取值对交通流的影响,经过与实测数据比较,为 ACC 车辆推荐了合适的车头时距值。

通过数值计算,得出混合交通流中存在着自由流、同步流和宽幅运动阻塞,但是当道路上只有 ACC 车辆时,出现了类似流体力学中均匀流的现象。同时发现 ACC 车辆的出现有利于提高交通流的整体流量、有效减少车辆集簇。本交通流模型虽然是单车道模型,但由于两种车型的运动规则都是基于元胞自动机模型,其方法便于拓展到双车道乃至多车道的交通流模型中,具有广泛的应用前景。

在后续的研究中,我们将关注实测数据的鉴别和整合,提升实测数据的真实性,从而提高交通流模型的仿真性;同时将关注在混合车辆的情形下有效分配路面资源的问题,本文提出的交通流模型在拓展到多车道甚至网络系统之后将可以作为研究资源分配的有效工具。

参考文献:

- [1] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal De Physique I, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [2] Barlovic R, Santen L, Schreckenburg A. Metastable states in cellular automata for traffic flow[J]. The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 1998, 5(3):793-800.
- [3] Takayasu M, Takayasu H. 1/f noise in a traffic model[J]. Fractals-Complex Geometry, Patterns, and Scaling in Nature and Society, 1993, 1(4):860-866.
- [4] Benjamin S C, Johnson N F, Hui P M. Cellular automaton models of traffic flow along a highway containing a junction[J]. Journal of Physics A: General Physics, 1996, 29(12):3119-3127.
- [5] Wolfgang K, Andreas S, Michael S, et al. Towards a realistic microscopic description of highway traffic[J]. Journal of Physics A: General Physics, 2000, 33(48):477-485.
- [6] Jiang R, Wu Q S. Cellular automata models for synchronized traffic flow[J]. Journal of Physics A: General Physics, 2003, 36(2):381-390.
- [7] Davis L C. Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow[EB/OL]. [2016-02-07]. <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.69.066110>.
- [8] Davis L C. Effect of adaptive cruise control systems on mixed traffic flow near an on-ramp[J]. Physica A, 2007, 379(1):274-290.
- [9] Davis L C. Optimality and oscillations near the edge of stability in the dynamics of autonomous vehicle platoons

- [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013, 392(17):3755-3764.
- [10] Davis L C. Improving traffic flow at a 2-to-1 lane reduction with wirelessly connected, adaptive cruise control vehicles[J]. *Physica A*, 2016, 451:320-332.
- [11] Ioannou P A, Stefanovic M. Evaluation of ACC vehicles in mixed traffic: Lane change effects and sensitivity analysis[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2005, 6(1):79-89.
- [12] Jiang R, Wu Q S. The adaptive cruise control vehicles in the cellular automata model[J]. *Physics Letters A*, 2006, 359(2):99-102.
- [13] Xie D F, Gao Z Y, Zhao X M. The effect of ACC vehicles to mixed traffic flow consisting of manual and ACC vehicles[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(12):4440-4445.
- [14] Yuan Y M, Jiang R, Hu M B, et al. Traffic flow characteristics in a mixed traffic system consisting of ACC vehicles and manual vehicles: A hybrid modelling approach[J]. *Physica A*, 2009, 388(12):2483-2491.
- [15] 华雪东, 王伟, 王昊. 考虑自适应巡航车辆影响的上匝道系统混合交通流模型[J]. *物理学报*, 2016, 65(8):219-231.
- [16] Pauwelussen J, Feenstra P J. Driver behavior analysis during ACC activation and deactivation in a real traffic environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(2):329-338.
- [17] Chang T H, Wang M C, Yu S M. Advance-F automatic car-following model and its traffic characteristics[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2011, 12(6):933-942.
- [18] 杨涛. 基于浮动车技术的路段交通流量推算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [19] Diana Y, Ioannis K. Longitudinal control of automated CHVs with significant actuator delays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1997, 50(5):1289-1297.
- [20] 张柠溪, 祝会兵, 林亨, 等. 考虑动态车间距的一维元胞自动机交通流模型[J]. *物理学报*, 2015, 64(2):299-305.
- [21] 吴正, 郭明旻. 交通实测视频与数据共享平台[EB/OL]. [2017-09-17]. <http://traflow.fudan.edu.cn/index.html>.
- [22] 祝会兵, 郭丽敏, 张柠溪, 等. 基于交通实测的交通流密度特性分析[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2015, 28(4): 20-24.
- [23] Wolfgang K, Ludger S, Andreas S, et al. Single-vehicle data of highway traffic: Microscopic description of traffic phases[EB/OL]. [2016-12-11]. <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.65.056133>.
- [24] Christopher N, Steven E S, Delphine C, et al. Cooperative Adaptive Cruise Control: Testing Drivers' Choices of Following Distances[EB/OL]. [2016-05-21]. <http://path.berkeley.edu/sites/default/files/publications/PRR-2010-39-XTO.pdf>.

Numerical simulation of mixed traffic flow including ACC vehicles and manually driven vehicles

CHEN Guang-yu¹, ZHU Hui-bing^{1*}, FAN Yue-yue²

(1.Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Department of Civil and Environmental Engineering, UC Davis, Davis 95616, USA)

Abstract: In this paper, we investigate the new type of traffic flow with mixture of manual vehicles and vehicles equipped with adaptive cruise control (ACC). We propose a mixed traffic flow model, in which the updating rules of ACC vehicles and manually driven vehicles are presented respectively in a more realistic manner based on the cellular automaton traffic flow model. The “constant-headway time” policy is chosen for the ACC vehicles, the effect of which on traffic flow is analyzed. The value of the constant-headway time is recommended by comparing the simulation results with the measured field data. It is found that the three traffic phases, i.e., free flow, synchronized flow and wide moving jams, also exist in the new mixed traffic flow system. However, the phenomenon of uniform flow is identified with ACC vehicles only when the density is moderate or high. Based on the spatial-temporal profiles of mixed traffic flow, it is found that the ACC vehicles help enhance the efficiency of the total traffic flow and reduce vehicles’ congestions.

Key words: ACC vehicle, cellular automaton, traffic flow model, nonlinear characteristic

(责任编辑 韩 超)