

瓶颈处车辆横纵向行为建模与分析*

何兆成[†] 孙文博 张力成 许菲菲 庄立坚

(中山大学工学院, 广东省智能交通系统重点实验室, 广州 510006)

(2013年3月20日收到; 2013年5月2日收到修改稿)

车辆的横向偏移现象在现实的交通流中广泛存在, 交通瓶颈处的横向偏移现象往往更加显著. 车辆间横纵向的运动相互干扰, 使得瓶颈交通流组织十分混乱, 通行能力受到显著影响. 为了研究瓶颈处车辆横纵向行为规律及其对交通流的影响, 提出一个考虑横向偏移特征的车辆行为模型: 通过引入目标转向角概念, 并结合经典优化速度模型, 给出了用于描述车辆的横纵向运动规律的运动方程, 同时通过分析车辆横向偏移特征, 制定了基于车辆行驶状态划分的目标转向角确定规则集. 数值模拟结果表明: 车辆的横向偏移会对交通流的运行产生影响, 在一定的横向偏移反应阈值下, 瓶颈处横向干扰于交通流的影响随着密度的增加而增加; 同时观察到了实际城市交通瓶颈的宏观及微观现象, 验证了模型的有效性.

关键词: 交通流, 瓶颈, 车辆行为, 横向偏移特征

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.62.168901

1 引言

交通瓶颈除了导致拥堵、降低道路通行能力之外还是诱发诸多复杂交通现象的直接原因, 有效把握城市交通瓶颈处的交通流运行规律是认识城市交通拥堵形成机理及其变化发展规律的关键所在. 近年来国内外对于交通瓶颈的研究已非常广泛. 首先, 针对匝道、交叉口、环岛以及车道变化路段等静态瓶颈路段, 已有大量基于统计或流体动力学理论的分析方法与成果^[1-5]. 然而这类方法主要面向宏观中车辆集计平均行为, 适用于静态瓶颈分析, 但无法满足对城市交通瓶颈动态变化的特征掌握的需求. 基于此, 许多学者尝试利用元胞自动机理论来研究瓶颈的复杂交通流现象^[6-10], 元胞自动机模型能够考虑人员、车辆及道路特点, 且易于在计算机上进行数值仿真, 但由于其微观上的离散性以及对车辆行为的极端抽象显得不够真实, 因而不容易实现对瓶颈处复杂交通行为的精确模拟, 并且模型的解析分析比较困难, 很难弄清楚产生复杂交通流行为的机制, 对于车辆交织现象复

杂的城市交通瓶颈路段交通流分析来说无法达到很好的效果. 因此, 引入具体研究车辆行为的微观理论才是解决上述问题的有效思路.

传统上微观车辆行为模型主要针对高速公路场景, 将车辆横纵向行为规律分割成较独立的跟驰与换道两大类模型. 车辆跟驰模型运用动力学方法来研究前导车运动状态变化所引起的跟驰车的相应行为. Reuschel^[11] 和 Pipes^[12] 提出了最早的跟驰模型, 认为车辆的加速度跟前后车的速度差成正比. Newell^[13] 认为车辆速度是依赖于车头间距的优化速度. 后来 Bando 等^[14] 在 Newell 研究基础上提出了优化速度 (optimal velocity, OV) 模型. 随后大量学者对 OV 模型进行了研究与改进, 在模拟现实车辆跟驰行为方面取得了许多重要研究成果^[15-19]. 然而以上这些研究都是建立在车辆行驶在道路中心线的假设上的, 缺乏对车辆横向行为的考虑. 传统上对于车辆横向行为的研究主要集中在换道模型方面^[20-23], 然而不论是哪类的换道模型, 通常只考虑了车辆“换与不换”两种决策以及在换道时的横向移动过程, 忽略了在现实中特别是在交通瓶颈处大量存在的忽略车道线限制的“弱车道”驾驶行

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA112311) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: hezhch@mail.sysu.edu.cn

为, 因此无法描述瓶颈处常见的挤道超车、插空行驶等复杂现象. 图 1 是在广州某公交车站所在路段统计得到的车辆横向位置分布情况图, 可以看到该路段车辆横向偏移现象非常明显, 最右边的车道由于靠近公交车站, 直接受到公交车进出车站的影响, 大量车辆出现了行驶在车道线附近甚至压在车道线上的“弱车道”驾驶行为. 进一步分析发现这些交通现象对于道路通行能力有较大影响, 从某种程度上来看, 甚至是导致交通拥堵发生的重要原因之一.

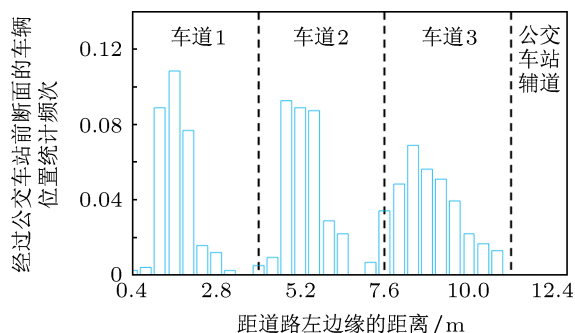


图 1 车辆横向位置分布情况

正因为如此, 一些学者开始考虑车辆横向偏移对于车辆跟驰行为的影响, Tang 等^[24]研究了邻近车道车辆对当前车道车辆跟驰行为的影响. Jin 和 Wang^[25-27]则提出了一个改进的全速度差模型, 后来又通过引入撞击时间 (time-to-collision, TTC) 的概念, 修正传统跟驰模型, 提出了一系列的交错跟驰模型. 交错跟驰模型虽然通过在传统跟驰模型中引入了横向偏移的因素, 然而其只强调了横向偏移对于纵向跟驰行为的影响, 缺乏对车辆横向偏移动机以及横纵向运动过程的描述, 导致这类模型还是无法有效地对各种复杂的车辆横纵向行为 (如车道内超车、单车道双车并行等) 进行分析.

为了弥补上述研究的不足, 同时为分析瓶颈处复杂交通现象及研究瓶颈处车辆驾驶行为提供新的思路, 本文提出了一种考虑横向偏移特征 (lateral separation characteristic, LSC) 的车辆行为模型来对瓶颈处车辆驾驶行为进行分析建模. 首先引入了用于描述车辆横向运动的关键: 目标转向角 (target steering angle, TSA), 并在此基础上结合经典的 OV 跟驰模型, 给出了相应的运动方程来描述车辆的横纵向运动规律; 其次, 通过分析车辆横向偏移特征, 制定了基于车辆行驶状态划分的目标转向角确定规则集; 最后运用数值模拟方法, 重点讨论了不同参数取值下模型的计算结果, 同时运用模型模拟分

析了公交车进站对于交通流运行的影响, 进一步验证了模型的有效性.

2 车辆行为模型的建立

车辆运动包括横向运动和纵向运动两个部分, 驾驶员通过打方向盘及踩油门、刹车来使得车辆同时产生横纵向的运动. 以往研究表明, 在车胎没有发生打滑的情况下, 车辆转向和加减速可以看成是两个独立的过程^[28], 因此, 本文将驾驶员控制车辆运动分解成为两个步骤的过程: 驾驶员先是通过打方向盘来获得一个目标转向角度, 然后通过踩油门、刹车来获得加减速, 从而使车辆按照一定的目标转向角进行运动. 因此, 目标转向角度是描述车辆横纵向运动过程的关键, 一般来说, 自身车辆与周围相关车辆的位置 (横纵向) 关系很大程度上影响了驾驶员对于目标转向角的确定. 下文给出的 LSC 模型主要包括两部分内容: 1) 车辆横纵向运动方程; 2) 基于车辆行驶状态划分的目标转向角确定规则集. 模型如图 2 所示.

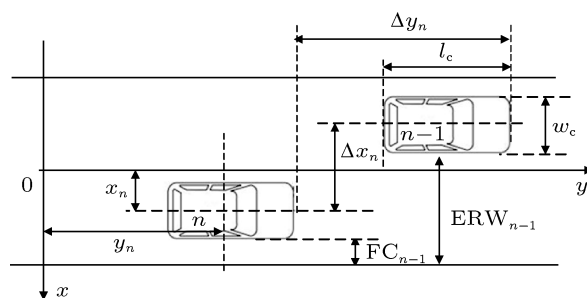


图 2 模型示意图

2.1 车辆运动方程

如前所述, 车辆横纵向运动可以分解为两个步骤, 同时我们假设: 第一, 驾驶员打方向盘只能改变速度的方向而不能改变速度的大小, 同时速度方向的改变是瞬间发生的; 第二, 当车辆处于跟驰行驶时, 车辆的加减速受前车影响, 其规律符合 OV 模型. 传统 OV 模型的基本形式如下:

$$\frac{dv_n(t)}{dt} = \alpha [V(\Delta y_n(t)) - v_n(t)], \quad (1)$$

其中 V 是车辆的优化速度, $v_n(t)$ 是第 n 辆车在 t 时刻的速度, α 为敏感系数. 车辆优化速度函数 V 的具体形式如下:

$$V(\Delta y_n) = V_1 + V_2 \tanh[C_1(\Delta y_n - l_c) - C_2], \quad (2)$$

其中 $\alpha = 0.85$, $V_1 = 6.75$ m/s, $V_2 = 7.91$ m/s, $C_1 = 0.13$ m⁻¹, $C_2 = 1.57$. Δy_n 是第 n 辆车的车头间距, l_c 是车长. 基于上述两个假设, 传统 OV 模型的基本形式可以改写为

$$\frac{dv_{n,y}(t)}{dt} = \alpha [V(\Delta y_n(t)) - v_{n,y}(t)], \quad (3)$$

其中 $v_{n,y}(t)$ 是 t 时刻车辆速度 $v_n(t)$ 在纵向 (y 轴方向) 上的投影.

基于上述假设, 在 t 时刻的转向阶段, 驾驶员确定了目标转向角 θ_t 以后, 原车辆速度方向瞬时

发生改变, 同时产生横向和纵向的速度分量 $v_{n,x}(t)$, $v_{n,y}(t)$; 在 t 时刻的加速阶段, 由于跟驰或超车等行为影响, 车辆获得纵向加速度 a_t , 由此可得到 $t+1$ 时刻前的纵向速度分量 $v'_{n,y}(t+1)$, 并由目标转向角可得到相应的车辆速度 $v'_n(t+1)$. 在 $t+1$ 时刻转向阶段, 驾驶员经过状态判断确定了新的目标转向角 θ_{t+1} , 又可以得到 $t+1$ 时刻的纵向速度 $v_{n,y}(t+1)$ 和横向速度 $v_{n,x}(t+1)$. 这样每个时刻两个阶段依次执行, 就确定了每个时刻的运动状态, 其过程及其计算公式如图 3 所示.

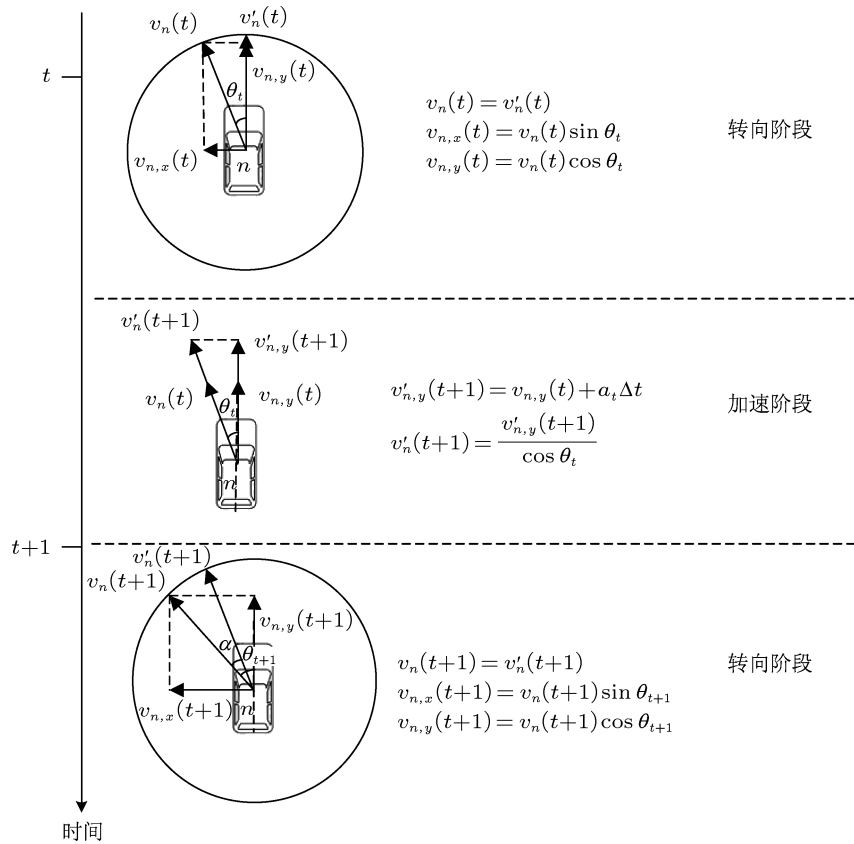


图 3 车辆运动状态更新流程

2.2 基于车辆行驶状态划分的目标转向角确定规则集

对于单车道情况, 在考虑车辆横向偏移且车道宽度可容纳两车并行的条件下, 基本的车辆行驶状态可以分为三种: 正常行驶状态、超车行驶状态及被超车行驶状态, 可以根据前后车不同的纵向相对位置来区分这三种状态, 如图 4 所示.

这里的超车行驶状态定义为跟驰车的形心越过前车的形心的瞬间开始 (即车头间距 $\Delta y_n \leq l_c/2$),

到跟驰车后保险杠越过前车前保险杠时结束 (即 $\Delta y_n \geq -l_c$) 这个阶段. 同时, 通过对大量视频数据进行观察, 可以发现在上述条件下, 车辆间行为也进一步变得复杂多样, 总结起来可以归纳为三类: 1) 前后车辆间的跟驰行为; 2) 后车为超越前车进行的加速追赶行为; 3) 后车在超越前车过程中 (不管最终能否超越) 产生的匀速并行行为. 结合车辆行驶基本状态以及相应的车辆行为, 可以进一步划分车辆行驶子状态, 并给出相应目标转向角 θ 确定规则集. 表 1 给出了本文的车辆行驶子状态划分情况.

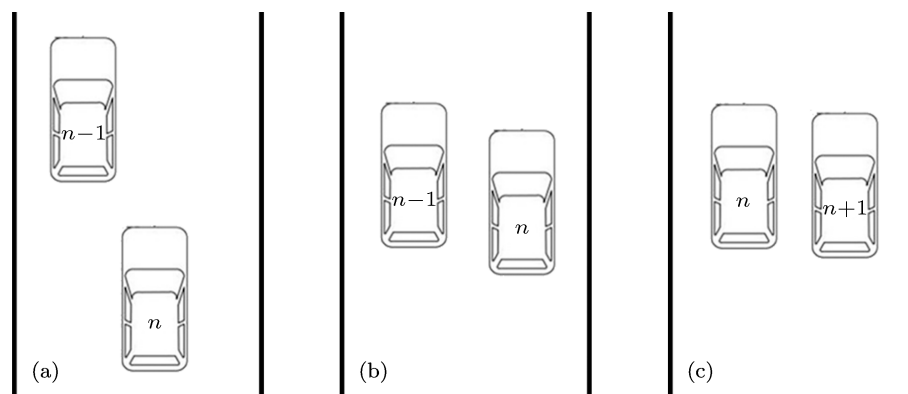


图4 行驶状态划分 (a) 正常行驶; (b) 超车行驶; (c) 被超车行驶

表1 车辆行驶子状态划分情况

		行驶状态			车辆运动
		正常	超车	被超车	
驾驶行为	跟随	横向偏移跟驰 前车跟驰	减速退让	自组织跟驰	跟驰 (变速)
	追赶	中心线跟驰 正常追赶	超车追赶	被超车追赶	加速
	并行	—	超越行驶	—	匀速

2.2.1 正常行驶状态

车辆处于正常行驶状态的判断条件是:

$$\Delta y_n > \frac{l_c}{2}, \quad \Delta y_{n+1} > \frac{l_c}{2}. \quad (4)$$

正常行驶状态下, 车辆间可以发生跟随和追赶行为, 按照跟随目标的不同, 具体可以细分为四个子状态: 正常追赶状态、横向偏移跟驰状态、前车跟驰状态和中心线跟驰状态, 如图5所示. 在非自由流的交通状态下, 驾驶员一方面会跟随前车行驶, 另一方面会尽量保持在车道中央运行. 然而, 当前车发生明显的横向偏移时, 跟驰车由于可以接收更多来自前侧向的信息, 也将会进行横向移动以获得更有利的行车环境. 本文将触发跟驰车横向移动行为的前车横向偏移临界值称为横向移动反应阈值 (lateral movement action threshold, LMAT). 如果前车的横向偏移量小于横向移动反应阈值, 说明前车横向偏移量较小, 跟驰车倾向于沿着车道中心线进行跟驰运动, 如图5(c)所示. 当前车的横向偏移量超过横向移动反应阈值, 说明横向移动很明显, 跟驰车受到前车的影响将进行横向移动, 但目标转向角的确定还需要考虑第二辆前车 (前车的前车) 是否“可见”, 并进行后续判断. 车辆进行横向移动而产生的

较大侧向净空被称为有效路径宽度 (effective route width, ERW)^[29] (见图2), 而第二辆前车“可见”可以认为是跟驰车与第二辆前车都位于前车的有效路径宽度的一侧.

当第二辆前车“不可见”时, 意味着跟驰车的行驶不受该车辆的影响, 为了获得更好的行车环境 (如更远的视野等), 跟驰车将朝前车有效路径宽度一侧进行横向运动, 如图5(a)所示. 此时跟驰车只需要考虑能否超越前车. 一般而言, 超车行为的发生需要满足两个条件: 一是需要产生超车意愿, 车辆行驶在道路上总是想要保持一个较高的期望速度, 因此只有当跟驰车的行驶受到前车的影响而需要减速时, 驾驶员才会产生超车的意愿; 二是通过目标超越车辆有效路径宽度的最大逃逸速度 (maximum escape speed, MES) 需要大于目标超越车辆的速度. 最大逃逸速度是由前后两辆车之间的侧向空隙即摩擦间隙 (frictional clearance, FC) 的大小决定的. 它们的关系式如下所示^[27]:

$$FC = \frac{ERW - w_c}{2}, \quad (5)$$

$$MES = -17.2(FC)^2 + 77.6(FC) - 0.7$$

$$FC < 1.5 \text{ m}, \quad (6)$$

其中 w_c 是车辆宽度, 当满足前车的超车条件时, 跟驰车将进入追赶状态以获得更快的行车速度, 而当不能满足超车条件时, 跟驰车将进入横向偏移跟驰状态, 等待时机超越前车. 只有在前车满足超车条件、跟驰车进入追赶状态并获得了足够的行车速度的情况下, 超车才有可能发生.

如果第二辆前车是“可见”的, 那么目标转向角的确定还需要考虑第二辆前车的行驶状态: 当满足第二辆前车的超车条件, 或者第二辆前车的速度不比前车速度小时, 此时可以认为只要超越前车那么

跟驰车将能获得更好的行车条件, 因此跟驰车将朝前车有效路径宽度一侧进行横向运动. 如果满足前车的超车条件, 那么跟驰车将进入追赶状态; 如果不满足前车超车条件, 跟驰车进入横向偏移跟驰状态. 当第二辆前车的超车条件不能满足, 同时第二辆前车的车速比前车小时, 可以认为第二辆前车的阻碍作用比前车更大, 跟驰车跟驰前车获得的利益要超过超越前车获得的利益, 此时跟驰车就进入前车跟驰状态, 如图 5(b) 所示. 根据以上思路, 正常行驶状态的具体的子状态划分规则如下.

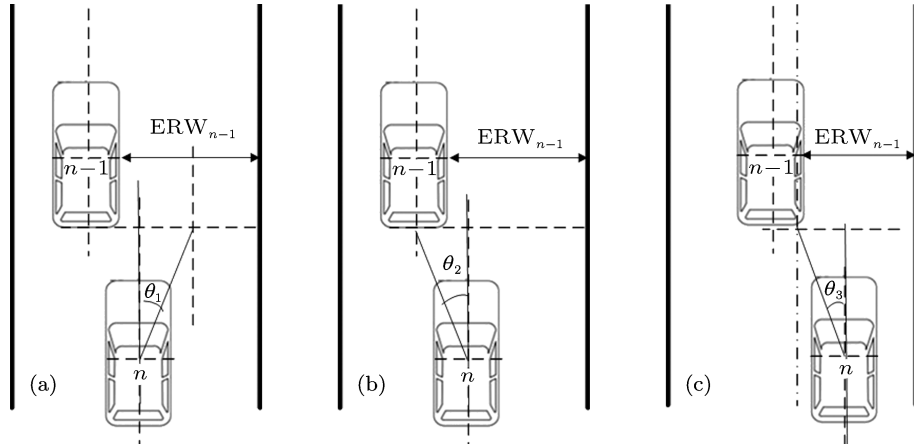


图 5 正常行驶状态的子状态划分 (a) 横向偏移跟驰、正常追赶; (b) 前车跟驰; (c) 中心线跟驰

第 n 辆车处于中心线跟驰状态的判定条件为

$$|x_n| < \text{LMAT}, \quad (7)$$

其中 x_n 是第 n 辆车的 x 轴坐标;

当 $|x_n| \geq \text{LMAT}$ 时, 第二辆前车“可见”的判断条件为

$$x_{n-1} > 0, \quad x_n < x_{n-1}, \quad x_{n-2} < x_{n-1} \quad (8)$$

或

$$x_{n-1} < 0, \quad x_n > x_{n-1}, \quad x_{n-2} > x_{n-1}, \quad (9)$$

此时如果以下条件成立, 则车辆处于前车跟驰状态:

$$\text{MES}_{n-2} \leq v_{n-2}, \quad v_{n-1,y} > v_{n-2,y}, \quad (10)$$

其中 MES_{n-2} 是超越第 $n-2$ 辆车即第二辆前车时的最大逃逸速度. 如果 (10) 式不成立, 且满足前车超车条件

$$\text{MES}_{n-1} > v_{n-1}, \quad a < 0, \quad (11)$$

车辆进入追赶状态, 其中 a 是运用 OV 模型以前车为跟驰目标计算出来的加速度, 也是三种跟驰子状态的加速度, a 为负则表示如果车辆选择跟驰前车,

那么就必须减速行驶. 追赶状态的加速度计算如下:

$$a = \frac{\text{MES}_{n-1}^2 - v_n^2}{2s}, \quad (12)$$

其中

$$s = \Delta y_n - \frac{l_c}{2}. \quad (13)$$

如果不满足前车超车条件, 则进入横向偏移跟驰状态.

当第二辆前车“不可见”, 即 (8), (9) 式都不成立时, 此时不需要考虑第二辆前车的情况. 如果满足前车超车条件, 即 (11) 式成立, 车辆将进入追赶状态. 如果不满足前车超车条件, 则进入横向偏移跟驰状态. 各子状态的目标转向角 θ 由图中的几何关系计算得到.

2.2.2 超车行驶状态

车辆处于超车行驶状态的判断条件是:

$$\frac{l_c}{2} \geq \Delta y_n \geq -l_c. \quad (14)$$

超车状态可以细分为三个子状态: 追赶子状态、超越行驶子状态及减速退让子状态, 如图 6 所示.

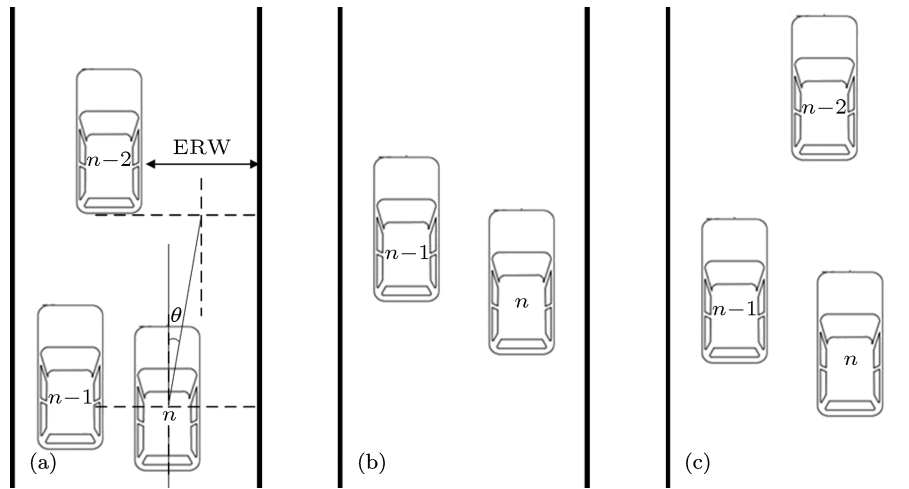


图6 超车状态的子状态划分 (a) 超车追赶; (b) 超越行驶; (c) 减速退让

当车辆处在超车状态时, 要想完成对当前车辆的超越, 前车与第二辆前车中间的纵向间隙必须要足够大, 本文将这种可实现超车的间隙临界值称为可超越间隙. 大量学者对可超越间隙的计算进行了研究, 为简化模型起见, 本文选择了2倍车长的固定值. 当前车与第二辆前车纵向间隙不小于可超越间隙时, 跟驰车将进入超越行驶状态, 优先完成对前车的超越, 如图6(b)所示. 驾驶员总是希望以最短的时间完成超越行为, 因此进入超越行驶状态的车辆将以MES做匀速直线运动.

当驾驶员发现前头两辆车间隙过小而无法完成对于前车的超越时, 为尽可能获得更好的利益, 将考虑第二辆前车的超车可能. 如果第二辆前车也不存在超车可能, 驾驶员将倾向于退出两车并排行驶回归正常行驶状态, 此时车辆立即进入减速退让状态, 减速退让的过程中车辆保持直线行驶, 不发生偏移, 如图6(c). 如果第二辆前车的超车可能存在, 正如正常行驶状态时考虑的那样, 还需要考虑再前一车辆即第三辆前车是否“可见”. 第三辆前车“不可见”时, 即可以忽略第三辆前车的的影响, 跟驰车进入追赶状态, 追赶第二辆前车, 如图6(a).

如果第三辆前车是“可见”的, 考虑第三辆前车的超车可能, 如果满足超车条件, 或者第三辆前车的速度不比第二辆前车速度小时, 与正常行驶状态相似, 跟驰车将进入追赶状态; 如果不满足超车条件, 同时第三辆前车的车速比第二辆前车小时, 跟驰车就会进入减速退让状态. 基于上述思想, 超车行驶状态具体的子状态划分规则如下.

第 n 辆车处于超越行驶子状态的判定条件是

$$\Delta y_{n-1} - l_c \geq AOP = 2l_c, \text{ 即 } \Delta y_{n-1} \geq 3l_c, \quad (15)$$

当 $\Delta y_{n-1} < 3l_c$, 且第二辆前车不存在超车可能时, 车辆处于减速退让子状态:

$$x_n x_{n-2} \geq 0 \quad (16)$$

或

$$x_n x_{n-2} < 0, \quad MES_{n-2} \leq v_{n-2}. \quad (17)$$

若(16), (17)式不成立, 即第二辆前车存在超车可能, 此时, 如果第三辆前车“可见”:

$$x_{n-2} < 0, \quad x_n > x_{n-2}, \quad x_{n-3} > x_{n-2} \quad (18)$$

或

$$x_{n-2} > 0, \quad x_n < x_{n-2}, \quad x_{n-3} < x_{n-2}, \quad (19)$$

并满足下列条件:

$$MES_{n-3} \leq v_{n-3}, \quad v_{n-2,y} > v_{n-3,y}, \quad (20)$$

则车辆处于减速退让子状态. 如果(20)式不成立, 或者第三辆前车“不可见”, 则车辆处于追赶子状态. 当车辆位于减速退让子状态时, 加速度的计算由OV模型并以前车为跟驰目标计算得出. 而车辆处于追赶状态时加速度的计算如下:

$$a = \frac{MES_{n-2}^2 - v_n^2}{2s}, \quad (21)$$

其中

$$s = \Delta y_{n-1} + \Delta y_n - \frac{l_c}{2}. \quad (22)$$

2.2.3 被超车行驶状态

车辆处于被超车行驶状态的判断条件是:

$$\frac{l_c}{2} \geq \Delta y_{n+1} \geq -l_c. \quad (23)$$

被超车行驶状态下只有两个子状态: 追赶子状态和自组织跟驰子状态, 如图 7 所示.

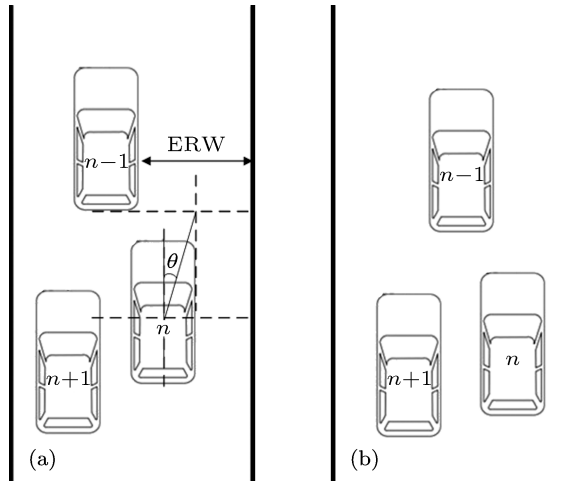


图 7 被超车状态的子状态划分 (a) 被超车追赶; (b) 自组织跟驰

当车辆被超车时, 如果不满足此时的前车超车条件, 由于受到超车车辆的影响, 此时跟驰车不再进行横向移动, 保持跟驰前车的状态, 称为自组织跟驰状态, 如图 7(b) 所示. 如果满足前车超车条件, 且跟驰车恰好位于前车有效路径宽度一侧, 说明跟驰车有机会不受超车车辆影响而追赶前车, 此时需要考虑第二辆前车是否“可见”. 若第二辆前车“不可见”, 则进入追赶状态追赶前车; 若第二辆前车“可见”, 则考虑第二辆前车的超车可能: 如果满足超车条件, 或者第二辆前车的速度不比前车速度小时, 那么跟驰车将进入追赶状态, 如图 7(a) 所示; 如果不满足超车条件, 同时第二辆前车的车速比前车小时, 跟驰车就会进入自组织跟驰状态. 本文忽略跟驰车追赶前车时发生横向移动而导致的有效路径宽度减小带来的影响. 基于上述思想, 被超车行驶状态具体的子状态划分规则如下.

第 n 辆车处于自组织跟驰子状态的判定条件是:

$$a \geq 0, \quad (24)$$

或

$$x_n x_{n-1} \geq 0, \quad (25)$$

或

$$x_n x_{n-1} < 0, \quad \text{MES}_{n-1} \leq v_{n-1}, \quad (26)$$

其中 a 是运用 OV 模型并以前车为跟驰目标计算出来的加速度, 也是自组织跟驰子状态的加速度. 若 (23)—(25) 式不成立, 即前车存在超车可能, 如果第二辆前车“可见”:

$$x_{n-1} > 0, \quad x_n < x_{n-1}, \quad x_{n-2} < x_{n-1}, \quad (27)$$

或

$$x_{n-1} < 0, \quad x_n > x_{n-1}, \quad x_{n-2} > x_{n-1}, \quad (28)$$

并满足下列条件:

$$\text{MES}_{n-2} \leq v_{n-2}, \quad v_{n-1,y} > v_{n-2,y}, \quad (29)$$

则车辆处于自组织跟驰子状态. 如果 (29) 式不成立, 或者第二辆前车“不可见”, 则车辆处于追赶子状态, 追赶子状态的加速度可以由 (12) 式计算可以得到. 目标转向角的确定如图 7 所示.

3 数值仿真实验

为了验证本文提出的 LSC 模型以及分析该模型的特性, 本文进行了数值模拟实验. 为简化计算, 实验中道路宽度为 4 m, 所有车辆长度都是 5 m, 宽度为 1.8 m. 仿真步长为 0.01 s.

首先研究车辆的横向偏移对于交通流的影响情况, 在周期边界条件下, 假设有 10 辆车运行在环路上, 所有车的初始车速为 $v_n(0) = 0$ m/s, 初始横向位移 $\Delta x_n(0) = 0$ m, 初始车头间距为

$$\Delta y_n(0) = \begin{cases} b & n \neq 1 \\ 100 + b & n = 1 \end{cases}, \quad (30)$$

其中 $b = 7.32$.

在仿真开始直到车队所有车辆都依次启动以后, 根据正态分布使车队每一辆车都随机产生横向偏移. 图 8 展示了在不同条件下车辆速度随时间的变化情况. 其中图 8(a) 是运用经典 OV 模型计算得出的结果, 图 8(b)—(d) 则是 LSC 模型在相同横向分布, 驾驶员的 LMAT 分别为 0.7, 0.5, 0.3 时计算得出的结果. 由图中可以看出, OV 模型得出的速度随着时间发生周期性的变化, 而考虑了横向偏移的 LSC 模型得出的速度, 随着车辆横向偏移的出现而开始出现扰动, 这说明车流出现横向偏移时会产生速度的扰动. 同时可以看到, 随着 LMAT 的减小, 速度的扰动也逐渐增加, 在 LMAT = 0.3 时速度扰动明显加大, 说明同样横向偏移对于交通流的干扰在不同的 LMAT 下有所不同, 当 LMAT 小于一定的数值时, 速度干扰将明显增加. 这是因为 LMAT 越小,

驾驶员对于前车的横向位移就越敏感,因而越容易将前车的横向干扰传递给上游车辆;而当 LMAT 较大的时,说明驾驶员更加谨慎,只有在前车出现明显偏移时才做出反应,这就使得横向干扰不容易

传播开来. 而如果驾驶员的 LMAT 超过了车辆可能的最大横向偏移量时,前车的横向偏移将无法影响到后车的运动,此时 LSC 模型就退化为传统 OV 模型.

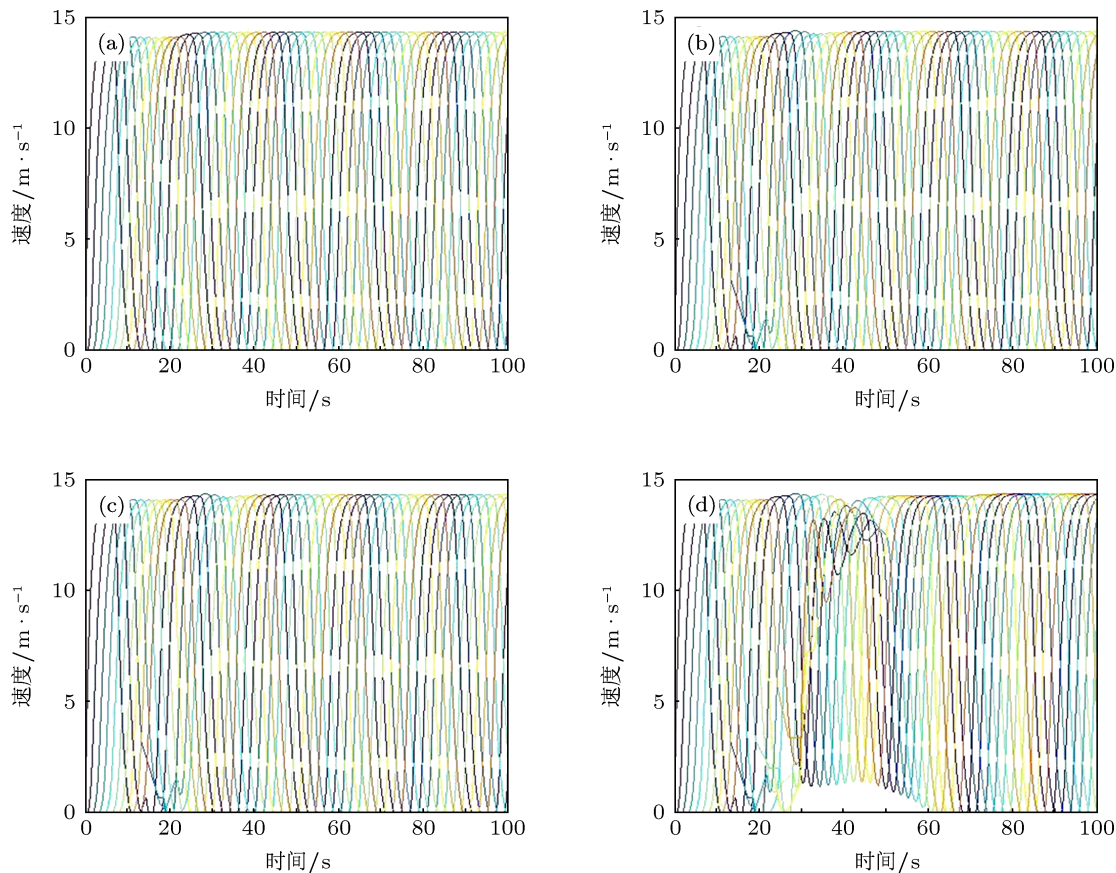


图8 横向干扰下的十辆车车队速度时序变化 (a) OV 模型; (b) LSC 模型, LMAT = 0.7; (c) LSC 模型, LMAT = 0.5; (d) LSC 模型, LMAT = 0.3

从图 9(d) 中可以观察到图中出现了实线相交的现象, 这表示车辆行驶过程中发生了超车现象. 而在图 8(b), (c), (d) 图中的某些时刻都可以观察到实线相切的情况 (如图 9(b) 第 15 s), 则说明出现了超车失败、两车车道内并排行驶的现象. 说明本文提出的考虑横向偏移特征的车辆行为模型可以更好地模拟出真实的交通运行状况.

为了进一步分析模型特性, 考察交通瓶颈处交通流的变化情况, 本文模拟了公交车进出站对不同密度下的交通流的影响. 实验设置了 10 辆车组成的均匀车流行驶在一条直线道路上, 其中车队第二辆车为公交车, 每隔 500 m 的地点有一个公交车站需要停靠. 为了简化计算, 本文采用简单的公交进出站模型: 公交车将会在距离车站 50 m 的地方开始往右靠站, 靠站加速度由当前车速及距离车站距离采用基本运动公式算出; 如果靠站过程中被其

他车辆右侧超车, 则暂停靠站; 公交车靠站后将在车站停留 5 s, 出站时则以普通跟驰状态驶出. 其他初始状态设置为: 初始车速 $v_m(0) = 0$ m/s, 初始横向位移 $\Delta x_n(0) = 0$ m, 除去首车外其他车辆初始车头间距 $\Delta y_n(0) = b$ ($n \neq 1$), $b = 7.32$, 驾驶员 LMAT = 0.7. 考虑到 OV 模型的特性, 不同密度下的稳定交通流速度不同, 为了设置不同的交通流密度, 本文先启动仿真, 此时公交车先不进行靠站行为, 待到交通流车头间距稳定到指定数值时, 公交车再开始进行靠站动作. 数值模拟的结果如图 10 和图 11 所示. 需要注意的是, 由于不同的车头间距稳定下来需要的时间不同, 因此为了方便观察, 上面四个图像 x 轴的零点都不是仿真开始的时刻, 而是交通流达到稳定之后, 在公交车开始靠站前约 20 s 的时刻. 图 10 给出了不同车头时距下车辆速度随着时间变化的情况. 从图中可以看到, 一方面, 车头间距

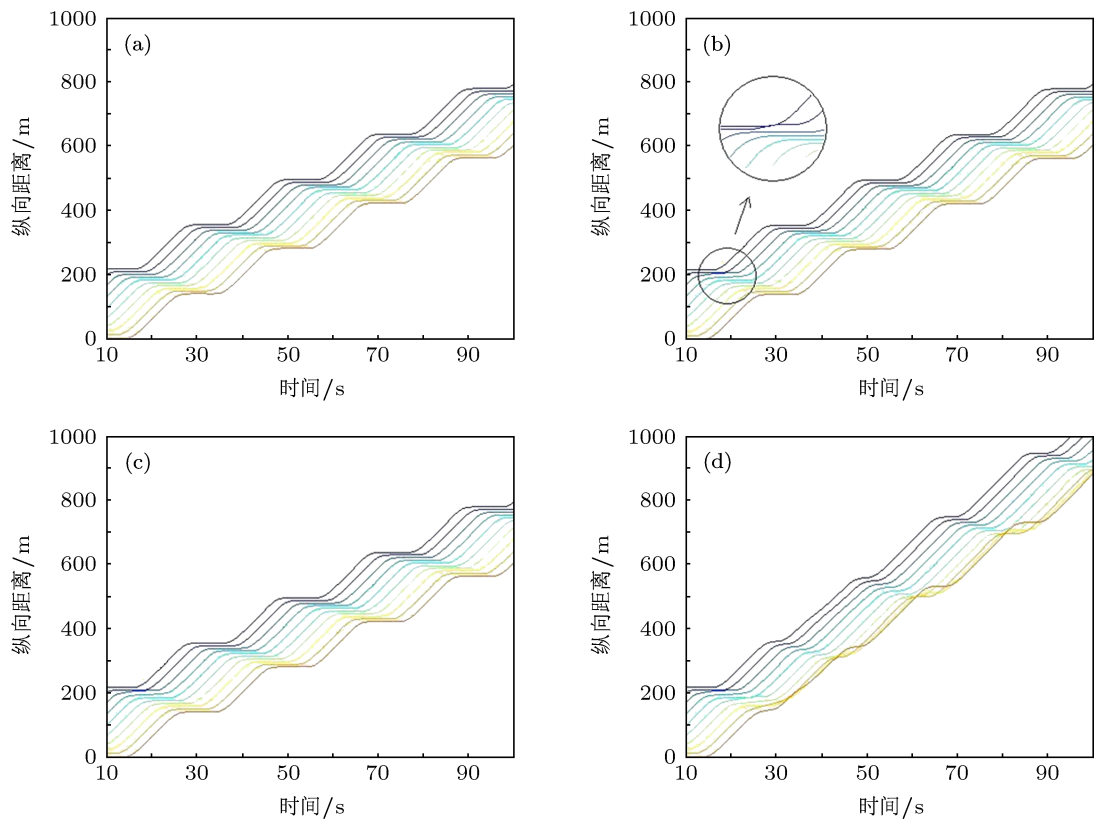


图9 横向干扰下的十辆车车队位置时序变化 (a) OV 模型; (b) LSC 模型, LMAT = 0.7; (c) LSC 模型, LMAT = 0.5; (d) LSC 模型, LMAT = 0.3

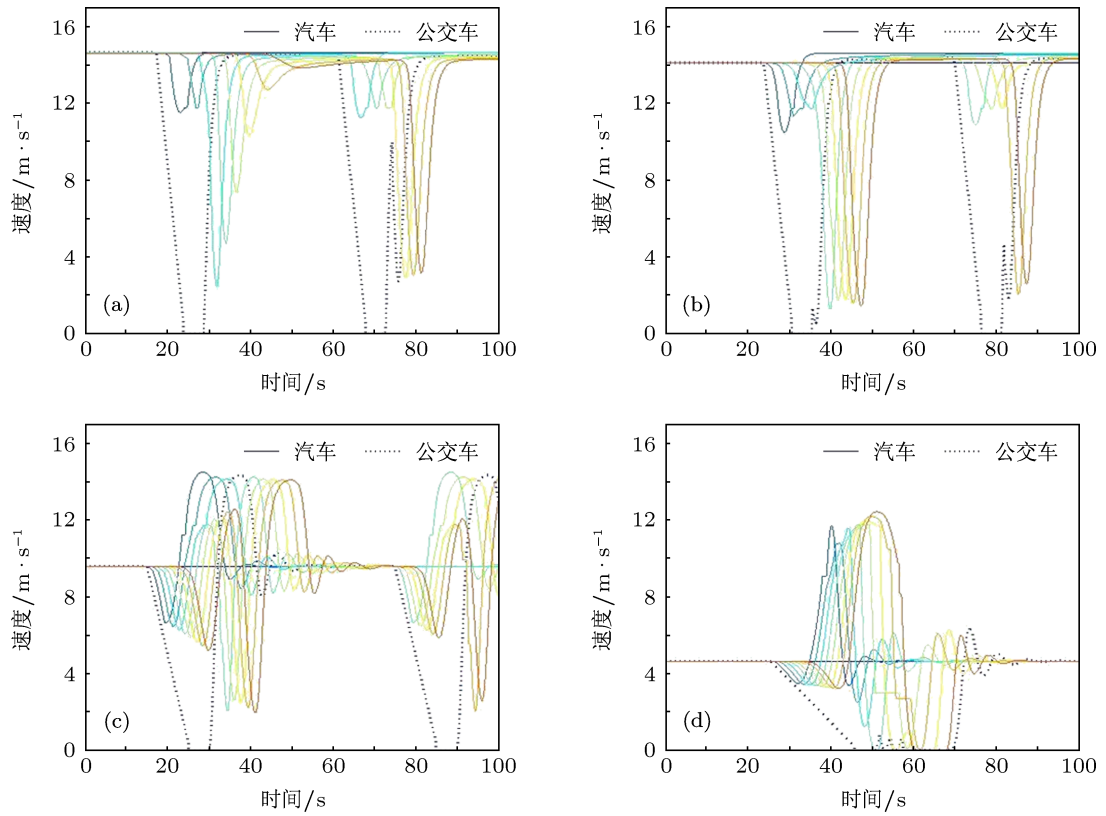


图10 公交车进站影响下的车队速度时序变化 (a) 初始间距 40 m; (b) 初始间距 30 m; (c) 初始间距 20 m; (d) 初始间距 15 m

越小, 交通流密度越大, 公交车的停靠站对于普通行驶车流的扰动幅度也越大, 交通流速度就越不稳定. 另一方面, 普通行驶车流对于公交车的运行的干扰也随着密度的增加而增加. 对比图 10(a), (d) 可以发现, 密度较小时公交车停靠站比较顺利, 停靠时间一般在设定的 5 s 左右, 而密度较大时由于出现了公交车与社会车辆相互抢道的现象, 最终公交车也被迫停留了多达 30 s, 相当于正常停车时间的 6 倍, 直到所有车辆离开才能启动. 这可能有两方面的原因: 第一, 高密度小车头间距使得大家距离近, 因此更容易发生连续超车; 第二, 高密度低速度使得大家更容易对当前车速不满, 同时公交车缓慢靠站使得车流需要减速等待出现足够的超车间距才能进行超车, 因此容易造成速度波动. 当公交车跟

试图超车的社会车辆互不相让时, 就容易造成交通拥堵的发生. 图 11 进一步说明了公交车运行对于交通流的干扰随着密度的增加而增加, 同时干扰会向上游传递. 可以看到图中虚线与实线相交的现象, 这表示虚线代表的公交车被实线代表的普通车辆所超越, 显然在车头间距越小, 车流密度越大的情况下, 一次超越公交车的车辆数也就越多, 这与前面的分析是一致的. 而某些时刻虚线与实线出现相切的情况 (如图 11(a) 第 30 s), 则说明出现了普通车辆尝试超越公交车失败, 最终公交车与普通车辆并排行驶的现象. 因此, 数值模拟的结果表明 LSC 模型能够重现公交车的停靠站对于交通流的影响, 同时能有效地描述实际瓶颈的宏观交通现象, 进一步体现了模型的真实性与有效性.

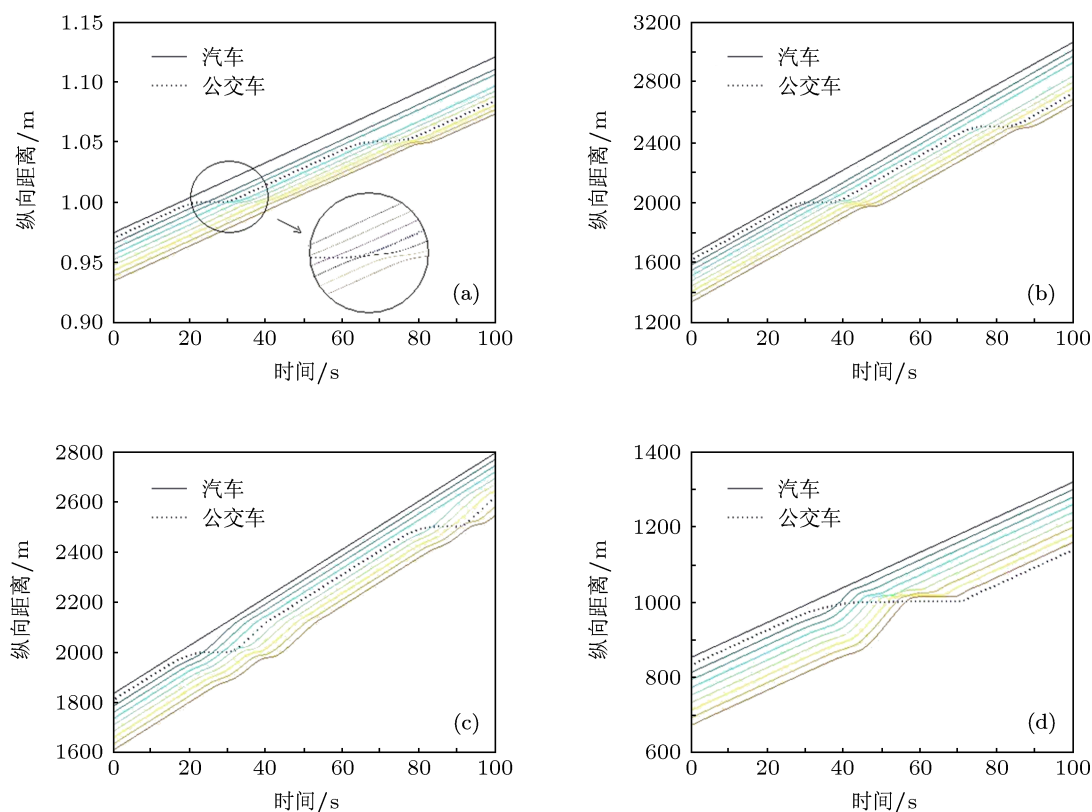


图 11 公交车进站影响下的车队位置时序变化 (a) 初始间距 40 m; (b) 初始间距 30 m; (c) 初始间距 20 m; (d) 初始间距 15 m

4 结论

本文通过建立用于描述车辆横纵向运动规律的运动方程, 以及制定考虑车辆横向偏移特征的基于车辆行驶状态划分的目标转向角确定规则集, 提出了一个考虑横向偏移特征的车辆行为模型 (LSCM), 实现了瓶颈处车辆横纵向行为的建模与分析. 根据数值模拟的结果可以得出以下结论:

1) 车辆的横向偏移会对交通流的运行产生影响, 这种影响随时间推移而向上游传播并逐渐减弱, 最终交通流将达到新的平衡态; 2) LMAT 的值越小, 车辆横向偏移对交通流的干扰越明显; 3) 公交车运行对于交通流的干扰随着密度的增加而增加, 同时观察到了因为公交车与社会车辆相互抢道而产生交通拥堵的现象, 进一步验证了该模型对于瓶颈车辆行为仿真的有效性.

与前人的研究相比,本文考虑了车辆横向偏移特征对车辆行驶的影响,更全面地考虑了驾驶员在车辆行驶中的决策过程,同时描述了瓶颈处车辆横纵向的运动规律.然而驾驶心理研究的困难及观测数据的缺失限制了模型的参数标定及校验工作,这

也将是下一步的研究重点.同时,需要进一步完善目标转向角的确定规则,提高模型的真实性与有效性,为研究交通瓶颈处的车辆行为及其交通流特征提供有效的工具.

-
- [1] He S, Guan W, Song L Y 2010 *Physica A* **389** 825
 - [2] Laval J A, Leclercq L 2010 *Phil. Trans. R. Soc. A* **368** 4519
 - [3] Kerner B S 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046138
 - [4] Siebel F, Mauser W, Moutari S, Rasclé M 2009 *Mathematical and Compute Modelling* **49** 689
 - [5] Munoz J C, Daganzo C 2002 *Trans. Res. Part B* **36** 483
 - [6] Jiang R, Wu Q S, Wang B H 2002 *Phy. Rev. E* **66** 036104
 - [7] Fouladvand E M, Zeinab S, Shaeabani R M 2004 *Phys. Rev. E* **70** 046132
 - [8] Zhu H B, Lei L, Dai S Q 2009 *Physica A* **388** 2903
 - [9] Sheng P, Zhao S L, Wang J F, Zuo H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3831 (in Chinese) [盛鹏, 赵树龙, 王俊峰, 左航 2010 物理学报 **59** 3831]
 - [10] 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]
 - [11] Reusch B 1950 *Oesterreichisches Ingenieur-Archiv* **4** 193
 - [12] Pipes L A 1953 *J. Appl. Phys.* **24** 274
 - [13] Newell G F 1961 *Oper. Res.* **9** 209
 - [14] Bando M, Nakayama A, Sugiyama Y 1995 *Phys. Rev. E* **51** 1035
 - [15] Helbing D, Tilch B 1998 *Phys. Rev. E* **58** 133
 - [16] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 017101
 - [17] Xue Y, Dong L Y, Yuan Y W, Dai S Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 492 (in Chinese) [薛郁, 董力耘, 袁以武, 戴世强 2002 物理学报 **51** 492]
 - [18] Xue Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2750 (in Chinese) [薛郁 2003 物理学报 **52** 2750]
 - [19] Xie D F, Gao Z Y, Zhao X M, Li K P 2009 *Physica A* **388** 2041
 - [20] Lü W, Song W G, Fang Z M 2011 *Physica A* **390** 2303
 - [21] Toledo T, Choudhury C, Ben-Akiva M 2005 *Trans. Res. Record* **1934** 157
 - [22] Kesting A, Treiber M, Helbing D 2007 *Trans. Res. Record* **1999** 86
 - [23] Yang X B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 837 (in Chinese) [杨小宝 2009 物理学报 **58** 837]
 - [24] Tang T Q, Huang H J, Gao Z Y 2005 *Phys. Rev. E* **72** 066124
 - [25] Jin S, Wang D H 2010 *Physica A* **389** 4654
 - [26] Jin S, Wang D H 2011 *Trans. Res. Record* **2249** 7
 - [27] Jin S, Wang D H 2012 *Phys. Lett. A* **376** 153
 - [28] Reymond G, Kemeny A, Droulez J, Berthoz A 2001 *Human Factors* **43** 483
 - [29] Gunay B 2007 *Trans. Res. Part B* **41** 722

Modeling and analysis of vehicle behavior at bottlenecks*

He Zhao-Cheng[†] Sun Wen-Bo Zhang Li-Cheng Xu Fei-Fei Zhuang Li-Jian

(Research Center of Intelligent Transportation System, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

(Received 20 March 2013; revised manuscript received 2 May 2013)

Abstract

Microscopic traffic models are developed to simulate traffic phenomena. However, current models are usually based on the fact that vehicles travel in the middle of a single lane and make a lateral movement only when the driver wants to change lane. They are incapable of describing driving behavior in a complex traffic environment with a lot of lateral separations which may cause traffic flow to be unstable on a single lane. In order to solve the problem, in this paper we first build up the equations of motion based on target steering angle (TSA) and then establish a series of rules for determining TSA by considering the lateral separation characteristics between the follower and the leader. Finally a new vehicular behavior model is developed. The properties of the model are investigated by simulating two scenarios. It is found that the proposed model is capable of describing complex phenomena which cannot be described by existing models and explaining the perturbation caused by bus near bus stations. The results also imply that this model with taking the lateral separation characteristic into account greatly enhances the effectiveness of vehicular behavior.

Keywords: traffic flow, bottleneck, vehicle behavior, lateral separation characteristic

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.62.168901

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA112311).

[†] Corresponding author. E-mail: hezhch@mail.sysu.edu.cn