

考虑横向分离与超车期望的车辆跟驰模型*

何兆成[†] 孙文博

(中山大学工学院, 广东省智能交通系统重点实验室, 广州 510006)

(2012年11月5日收到; 2012年12月27日收到修改稿)

为了更加客观地描述实际的车辆跟驰行为, 在优化速度模型的基础上, 通过引入横向分离参数并提出超车期望和虚拟前车的概念, 建立了考虑横向分离与超车期望的车辆跟驰模型. 对模型进行线性稳定性分析, 得到了模型稳定性条件, 发现车辆横向分离、超车期望和虚拟前车的位置的增加, 在车流密度较小、车速较快的情况下, 使得交通流稳定区域增大, 但在车流密度较大、车速较慢的情况下, 反而使得交通流稳定区域减小. 数值模拟结果验证了模型稳定性分析的结果, 表明在交通瓶颈处等交通流密度较大、运行缓慢的区域, 为抑制交通拥堵, 应该限制车辆的横向偏移和超车行为的发生.

关键词: 交通流, 车辆跟驰模型, 横向分离, 超车期望

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

DOI: 10.7498/aps.62.108901

1 引言

随着我国社会经济的快速发展以及城市化进程的推进, 城市的汽车保有量越来越多, 交通问题也越来越突出. 微观车辆跟驰模型研究单个车辆在其他车辆干扰下的行为规律, 在分析与研究交通流特性, 剖析交通拥堵形成原因等方面起着重要的作用, 同时也广泛地应用在交通仿真、交通安全等诸多领域.

最早的刺激 - 反应车辆跟驰模型是由 Reuschel^[1] 和 Pipes^[2] 分别独立提出的, 他们认为车辆对刺激的反应强度与速度差成正比. 后来 Newell^[3] 提出了不同的车辆跟驰模型, 他假定车辆速度是依赖于车头距的优化速度. 1995 年 Bando 等^[4] 在 Newell 模型的基础上提出了优化速度 (optimal velocity, OV) 模型, 不仅解决了 Newell 模型存在的不能描述静止车队中头车起动过程的问题, 而且大量数值模拟分析的结果表明应用该模型可以模拟实际交通流的许多非线性特征, 如交通失稳、阻塞演化、走走停停等^[5-8], 因而该模型被迅速广泛应用. 此后, 在 OV 模型的基础上, 国内外学者又做了大量的研究, 提出了一系列新模型. Helbing

和 Tilch^[9] 考虑速度差因素的影响, 提出了广义力 (generalized force, GF) 模型. GF 模型解决了 OV 模型加速度过大的问题. 然而, 进一步的研究表明该模型存在着运动延迟时间过长和启动波速过小的问题. Jiang 等^[10] 认为, GF 模型的问题是由于没有考虑正的速度差对车辆动力学的影响, 因此他们提出了全速度差 (full velocity difference, FVD) 模型. 与 OV 模型和 GF 模型相比, FVD 模型在模拟车辆运动延迟时间和车辆启动波速时, 与实际观测到的结果更为符合. 薛郁等^[11,12] 则提出了考虑车辆相对运动速度的 OV 模型和随机计及相对速度的车辆跟驰模型, 利用线性稳定性理论和数值模拟方法, 讨论了在交通流演化过程中相对运动速度的稳定作用. 然而, 以上以 OV 模型为代表的传统跟驰模型都是建立在车辆行驶在道路中心线的基本假设上的, 但是实际的车辆运行情况却不是如此. 由于实际交通环境以及驾驶行为的复杂性, 车辆的行驶总是存在着一定程度的横向偏移, 形成车辆之间交错行驶的状况, 车道线的概念实际上已经被弱化, 这种状况会对驾驶员的实际跟驰行为产生较大的影响^[13]. 为了考虑车辆横向偏移带来的影响, Jin 和 Wang^[14] 考虑车辆在做跟

* 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

驰运动时,当前车辆与前车的横向偏移情况导致当前车辆的跟驰不仅受到前车的影响,还会受到再前一辆车的影响,据此他们引入了横向分离参数,提出了非车道全速度差 (non-lane-based full velocity difference, NLBFVD) 模型. 后来, Jin 和 Wang 又引入了撞击时间 (time-to-collision, TTC) 的概念来考虑横向分离的影响,并结合传统的车辆跟驰模型,提出了一系列的新模型^[15,16],做了一些有益的探索.

遗憾的是,上述研究只考虑了车辆横向偏移带来的横向分离的影响,认为相同的车辆横向分离对跟驰车跟驰行为的影响是相同的,但实际上在横向分离相同的情况下,由前车横向位置的不同形成的不同侧向净空宽度,会使跟驰车的驾驶员形成不同的超车刺激,因而对驾驶行为产生不同的影响. 基于这样的考虑,本文在经典 OV 模型的基础上,引入横向分离参数并提出超车期望与虚拟前车的概念来考虑车辆横向偏移对跟驰车辆的影响,从而提出了一种考虑横向分离与超车期望的车辆跟驰模型,利用线性稳定性理论研究该模型的线性稳定性条件,同时在周期边界条件下对该模型进行数值模拟,分析模型的主要特性并验证模型的合理性.

2 模型建立

Bando 在 1995 年提出的 OV 模型的微分方程描述如下:

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

$$V(\Delta x_n(t)) = 0.5v_{\max} [\tanh(\Delta x_n(t) - h_s) + \tanh(h_s)], \quad (2)$$

$$\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t), \quad (3)$$

其中, α 是敏感度系数,为反应时间 τ 的倒数; $V(\Delta x_n(t))$ 是优化速度函数; $v_n(t)$ 是 t 时刻第 n 辆车的速度; $\Delta x_n(t)$ 是 t 时刻第 n 辆车的车头间距; $x_{n+1}(t)$ 和 $x_n(t)$ 分别是 t 时刻第 $n+1$ 辆车和第 n 辆车的位置; v_{\max} 是车辆最大优化速度, h_s 是车辆安全间距.

我国学者金盛、王殿海在 2010 年提出的 NLBFVD 模型是在 FVD 模型的基础上引入了横向分离参数来考虑车辆横向分离的影响,认为当前车辆的跟驰不仅受到前车的影响,由于横向分离它还受到第二辆前车的影响,而这两种影响的分配由横向分离参数决定:横向分离越小,跟驰车受前车

影响越大;横向分离越大,跟驰车受第二辆前车影响越大. 其模型微分方程描述如下:

$$\begin{aligned} & \frac{dv_n(t)}{dt} \\ & = a \{V[\Delta x_{n,n+1}(t), \Delta x_{n,n+2}(t)] - v_n(t)\} \\ & \quad + \kappa G(\Delta v_{n,n+1}(t), \Delta v_{n,n+2}(t)), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & V[\Delta x_{n,n+1}(t), \Delta x_{n,n+2}(t)] \\ & = V[(1-p_n)\Delta x_{n,n+1}(t) + p_n\Delta x_{n,n+2}(t)], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & G(\Delta v_{n,n+1}(t), \Delta v_{n,n+2}(t)) \\ & = (1-p_n)\Delta v_{n,n+1}(t) + p_n\Delta v_{n,n+2}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, κ 为速度差的敏感系数, $\Delta x_{n,n+1}(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t)$ 是 t 时刻跟驰车 n 与前车的车头间距, $\Delta x_{n,n+2}(t) = x_{n+2}(t) - x_n(t)$ 是 t 时刻跟驰车 n 与第二辆前车的车头间距, $V(\cdot)$ 是优化速度函数. p_n 是横向分离参数,满足:

$$p_n = LS_n / LS_{\max}, \quad (7)$$

式中 LS_n 为跟驰车与前车的横向分离值, LS_{\max} 是最大横向分离值,当车辆横向分离达到最大值时表明车辆已经位于两条不同车道上,此时前车不再对跟驰车辆产生影响,因此 LS_{\max} 可以取普通道路的宽度 3.6 m.

NLBFVD 模型虽然考虑了车辆横向分离对跟驰车辆带来的影响,但在实际的车辆行驶过程中,车辆的横向偏移不仅会造成前后车辆的横向分离,而且会形成不同的侧向净空宽度,对于跟驰车来说就会形成不同的超车刺激,因而对车辆跟驰行为产生重要影响. 在同样横向分离的情况下,前车的横向位置越偏离车道边缘,留下的侧向净空宽度越大,对跟驰车驾驶员的刺激就越大,跟驰车辆会更靠近前车以试图进行超车. 因此本文在 OV 模型的基础上,参考 NLBFVD 模型建模思想,通过引入横向分离参数 p_n 来考虑车辆横向分离的影响,同时提出超车期望和虚拟前车的概念来考虑驾驶员超车积极性的影响,从而建立了一种考虑横向分离与超车期望的车辆跟驰模型.

本文把由于前车横向偏移而产生的较宽一侧的侧向净空称为可通过间隙,同时把可通过间隙产生的对驾驶员的超车刺激称为超车期望,用来衡量跟驰车驾驶员考虑超车行为的积极性. 当可通过间隙小于一倍车宽,或者跟驰车与前车横向完全分离,前车对跟驰车不再产生影响时,显然驾驶员不会产生超车期望. 而当驾驶员产生超车期望,开始考虑超车行为时,本文假设驾驶员为确保安全,会

设想在可通过间隙处存在一辆虚拟前车, 因此跟驰车的超车行为将受到这辆虚拟前车的影响, 超车期望越大, 受到虚拟前车的影响也越大. 这样, 通过引入横向分离参数和提出超车期望与虚拟前车的概念, 就可以建立一种考虑横向分离与超车期望的车辆跟驰模型. 模型如图 1 所示. 其中, $\Delta x_{n,n+1^v}$ 为 t 时刻第 n 辆车与虚拟前车的车头间距, 本文假设虚

拟前车与跟驰车的车间距是前车与跟驰车车间距的 γ 倍, 由于虚拟前车的存在实际上是驾驶员对超车行为的自我约束, γ 取值越大, 虚拟前车对跟驰车的影响越小, 说明驾驶员的自我约束越弱, 侵略性越强. γ 取值对交通流的影响将在后面讨论. LS_n 为跟驰车与前车的横向分离值, W_{n+1} 为前车的可通过间隙宽度.

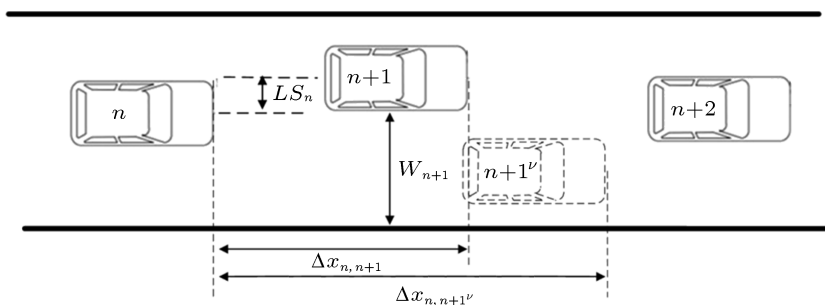


图 1 模型示意图

本文采用超车期望参数 o_n 来衡量超车期望的大小. 根据定义, o_n 应该具有以下几个特性: 1) o_n 随着前车的可通过间隙宽度 W_{n+1} 的增加而增加; 2) 当前车的可通过间隙宽度 W_{n+1} 小于或等于一个车辆宽度 W_{car} 时, 此时不存在超车可能, 因此 o_n 为 0; 3) 当前车的可通过间隙宽度 W_{n+1} 大于或等于最大可通过间隙 W_{max} 时, 此时我们认为跟驰车近似于可以实现换道超车, o_n 为 1, 因此 W_{max} 可以取普通道路宽度大小 3.6 m. 基于以上这些特性, o_n 可以定义为

$$o_n = \begin{cases} 0 & W_{n+1} < W_{car} \\ \frac{W_{n+1} - W_{car}}{W_{max} - W_{car}} & W_{car} \leq W_{n+1} \leq W_{max} \\ 1 & W_{n+1} > W_{max} \end{cases} \quad (8)$$

最后需要特别指出的是, 超车期望的大小与超车行为是否发生没有必然联系. 当可通过间隙大于车辆宽度时, 驾驶员会产生超车期望, 但并不代表跟驰车必然会进行超车而不再考虑跟驰行为, 超车期望的大小只是用来衡量前车可通过间隙对于跟驰车的吸引程度大小, 而超车行为的发生不仅取决于超车期望的大小, 同时还会受包括前车在内的周围其他车辆运动状态的影响.

考虑模型的几种特殊情况: 当 p_n 为 0 时, 说明前后两辆车之间没有横向分离, 因此跟驰车不受第二辆前车的的影响, 只考虑前车和虚拟前车的的影响: 此时超车期望越大, 那么前车的的影响越小, 虚拟前

车影响越大; 当 p_n 为 1 时, 意味着前后两辆车横向完全分离, 处在不同的车道上, 因此跟驰车只受第二辆前车的的影响; 当 o_n 为 0 时, 前车不存在超车可能, 跟驰车将不考虑第二辆前车的的影响, 即只跟驰前车; 当 o_n 为 1 时, 意味着前车可以被换道超越, 跟驰车将不考虑前车的跟驰影响, 即只考虑虚拟前车与第二辆前车的的影响. 基于以上建模思想, 模型微分方程建立如下:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} \\ &= \alpha \left\{ V \left[\Delta x_{n,n+1}(t), \Delta x_{n,n+1^v}(t), \Delta x_{n,n+2}(t) \right] \right. \\ & \quad \left. - \frac{dx_n(t)}{dt} \right\}, \quad (9) \\ & V \left[\Delta x_{n,n+1}(t), \Delta x_{n,n+1^v}(t), \Delta x_{n,n+2}(t) \right] \\ &= V \left[(1 - p_n) \left((1 - o_n) \Delta x_{n,n+1}(t) + o_n \Delta x_{n,n+1^v}(t) \right) \right. \\ & \quad \left. + p_n \left((1 - o_n) \Delta x_{n,n+1}(t) + o_n \Delta x_{n,n+2}(t) \right) \right]. \quad (10) \end{aligned}$$

为了方便下一节模型稳定性分析, 运用向前差分的方法可以将 (9) 式改写为

$$\begin{aligned} & x_n(t + 2\tau) \\ &= x_n(t + \tau) + \tau V \left[\gamma (1 - p_n) o_n \Delta x_{n,n+1}(t) \right. \\ & \quad \left. + (1 - o_n) \Delta x_{n,n+1}(t) + p_n o_n \Delta x_{n,n+2}(t) \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

3 线性稳定性分析

交通流的稳定性研究主要考察小扰动在交通

流中的演化过程. 研究交通流模型的稳定性特征, 能够明确影响驾驶员的各种交通状态和环境因素对交通流的影响, 从而可以为提高交通流的稳定性, 抑制交通拥堵提供理论支持. 本文利用线性稳定性理论对所建立的模型进行稳定性分析. 假设给定初始状态是稳定态, 本文考虑具有相同横向分离 LS_n 和相同可通过间隙 W_n 的均匀交通流状态, 此时所有车辆有均匀的车头间距, 并以优化速度 $V(h, 2h)$ 在道路上行驶. 此时, 可以得到车辆稳态位置解为

$$x_n^0(t) = hn + V(h, 2h)t, \quad (12)$$

$$V(h, 2h) = V \left[(1 - p_n) ((1 - o_n)h + o_n(\gamma h)) + p_n ((1 - o_n)h + 2o_nh) \right]. \quad (13)$$

对上述稳态交通流施加一个小扰动, 即

$$x_n(t) = x_n^0(t) + y_n(t). \quad (14)$$

将 (14) 式代入 (11) 式, 并将得到的结果线性化, 可得扰动传递差分方程:

$$\begin{aligned} & y_n(t + 2\tau) \\ &= y_n(t + \tau) + \tau V'(h, 2h) \\ & \times \left[\gamma(1 - p_n)o_n \Delta y_{n,n+1}(t) \right. \\ & \left. + (1 - o_n) \Delta y_{n,n+1}(t) + p_n o_n \Delta y_{n,n+2}(t) \right], \quad (15) \end{aligned}$$

$$V'(h, 2h)$$

$$= dV(\Delta x_n) / d\Delta x_n |_{\Delta x_n = (1 + (\gamma - 1)o_n + (2 - \gamma)o_n p_n)h}. \quad (16)$$

将 $y_n(t)$ 按照傅里叶级数展开, 得到 $y_n(t) = A \exp(ikn + zt)$, 代入 (15) 式得到:

$$\begin{aligned} e^{2z\tau} &= e^{z\tau} + \tau V'(h, 2h) \left[((\gamma(1 - p_n) - 1)o_n \right. \\ & \left. + 1)(e^{ik} - 1) + p_n o_n (e^{2ik} - 1) \right]. \quad (17) \end{aligned}$$

令 $z = z_1(ik) + z_2(ik)^2 + \dots$, 代入 (17) 式, 可以得到一阶和二阶项的系数如下:

$$\begin{cases} z_1 = (a + 2b) V'(h, 2h), \\ z_2 = \frac{a + 4b}{2} V'(h, 2h) \\ \quad - \frac{3\tau(a + 2b)^2}{2} V'(h, 2h)^2, \end{cases} \quad (18)$$

其中, $a = o_n(\gamma - 1 - \gamma p_n) + 1$, $b = p_n o_n$.

因此可得模型的临界稳定性曲线方程为

$$\tau = \frac{a + 4b}{3V'(h, 2h)(a + 2b)^2}, \quad (19)$$

那么稳定条件为

$$\tau < \frac{a + 4b}{3V'(h, 2h)(a + 2b)^2}. \quad (20)$$

图 2 给出了不同参数下的临界稳定曲线图, 可以看到临界稳定曲线将坐标平面分成了两个部分, 临界稳定曲线以下为不稳定区域, 表现为交通阻塞、时走时停等, 临界稳定曲线以上则为稳定区域, 表现为交通流能平稳运行. 图 2 表明曲线的顶点即临界点 (h_c, α_c) 在不同的模型参数组合下是不同的. 在这里临界敏感系数 α_c 的意义在于, 当驾驶员的敏感系数 $\alpha > \alpha_c$ 时, 不管均匀交通流的车头间距的大小如何, 它在小扰动下总是可以保持稳定的. 而当均匀交通流的车头间距大小在 h_c 左右时, 对于驾驶员的反应时间的要求最高, 此时 $\alpha < \alpha_c$, 那么小扰动将会使初始稳定状态最终演变为时走时停的不稳定交通状态.

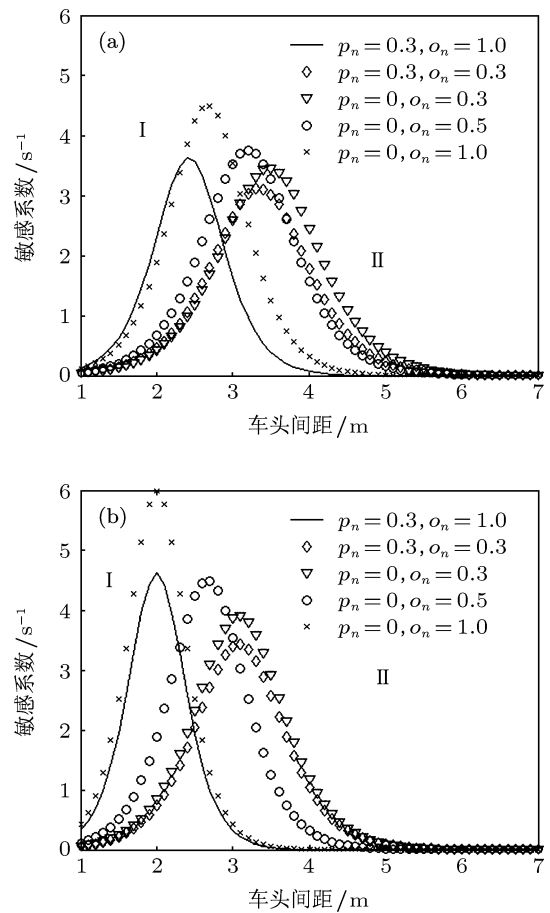


图 2 临界稳定曲线图 (a) $\gamma = 1.5$; (b) $\gamma = 2$

由模型方程及稳定性条件可以知道, 以临界车头间距 h_c 为界, 当车头间距 $h < h_c$ 时, 交通流将呈现低速稳定运行状态 (图 2 中 I 区); 而当车头间距 $h > h_c$ 时, 交通流将呈现高速稳定运行状态 (图 2 中 II 区). 结合图 2 可以看出: 首先, 随着 o_n 的增加, 曲线顶点向左上方偏移, 即临界车头间距 h_c 减小, 临界敏感系数 α_c 增加, 这表明超车期望越高, 均匀交

通流可以在更高的密度下呈现高速稳定运行状态,但是对于驾驶员反应的要求也相应提高,尤其在临界密度附近容易导致不稳定状态的出现,这与实际交通情况相符;其次,随着 p_n 的增加,曲线顶点向左下方偏移,即临界车头间距减小,临界敏感系数减小,表明横向分离越大,前车对于跟驰车的影响减小,对于驾驶员反应的要求也就降低,同时交通流也可以在更高的密度下稳定,这也与实际交通情况相符;再次,通过对比图 2(a) 和 (b) 可以发现,随着 γ 的增大,曲线的顶点向左上方偏移,表明虚拟前车的距离越远,即驾驶员侵略性越强,均匀交通流可以在更高的密度下以较快的速度稳定运行,同时对驾驶员反应的要求提高,显然这是符合实际情况的;最后,随着 γ , o_n 以及 p_n 的增大,可以看到曲线整体向左偏移,表明在车流密度较小、车速较快的情况下,交通流稳定区域增大,更加值得注意的是,在车流密度较大、车速较慢的情况下,交通流稳定区域随着 γ , o_n 以及 p_n 的增大反而减小,这可以解释为在交通运行顺畅,车流密度小的时候,驾驶员侵略性越强,超车期望越高,横向分离越大,交通流产生的小扰动越不容易影响车辆运行情况,同时车辆有足够的车间距来做出反应,因而不容易发生交通拥堵情况;但在交通运行缓慢,车流密度大的时候,车辆并没有足够的车间距来对交通流扰动做出反应,因而越强的侵略性、超车期望以及横向分离情况反而越容易使扰动迅速演变为交通拥堵,这也正反映了城市交通瓶颈处往往会发生车辆抢道超车而形成交通拥堵的实际情况.

4 数值模拟

在稳定性分析的基础上,本文采用数值模拟的方法验证模型的有效性,进一步研究分析模型特性.对于较小的 o_n 和 p_n 来说,仿真不会出现真实的超车现象,因此在仿真实验中我们只考虑较小的 o_n 和 p_n 对交通流的影响情况.为方便数值模拟实验的进行,将 (11) 式改写为下面的形式:

$$\begin{aligned} & \Delta x_{n,n+1}(t+2\tau) \\ &= \Delta x_{n,n+1}(t+\tau) + \tau V \left[\gamma(1-p_{n+1})o_{n+1}\Delta x_{n+1,n+2} \right. \\ & \quad \left. + (1-o_{n+1})\Delta x_{n+1,n+2} + p_{n+1}o_{n+1}\Delta x_{n+1,n+3} \right] \\ & \quad - \tau V \left[\gamma(1-p_n)o_n\Delta x_{n,n+1} + (1-o_n)\Delta x_{n,n+1} \right. \\ & \quad \left. + p_n o_n \Delta x_{n,n+2} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

在周期边界条件下,假设有 100 辆车行驶在环路上,车队所有车辆的横向分离与超车期望都是相同的,初始车头间距设置如下:

$$\Delta x_{n,n+1}(t)|_{t=0,1} = \begin{cases} h, & n \neq 50, 51 \\ h-0.5, & n = 50 \\ h+0.5, & n = 51 \end{cases}. \quad (22)$$

选取 (2) 式作为优化速度函数,参数取值为 $v_{\max} = 2 \text{ m/s}$, $h_s = 4 \text{ m}$, $\alpha = 1/\tau = 2 \text{ s}^{-1}$.

首先考察在车流密度较小、车速较快的情况:在 (22) 式中取 $h = 4 \text{ m}$,图 3 是 $\gamma = 1.5$ 时,不同 o_n 和 p_n 组合下,数值模拟仿真开始 10000 s 后车头间距的时空变化图.可以看到图 3(a), (b), (c) 中的交通不稳定程度依次减弱,表明在车流密度较小、车速较快的情况下,随着超车期望的增加,交通流不稳定程度减小,在较大横向分离影响的情况下,交通拥堵最终消失,形成稳态交通流,如图 3(d) 所示.图 4 进一步表明,在交通流运行了足够长 (10000 s) 的时间后,超车期望和横向分离越强,交通流不稳定程度越小,表明这种情况下超车期望与横向分离的增强能起到稳定交通流的作用.图 5 给出了 p_n 为 0, γ 分别为 1.5 和 2 时,仿真第 10000 s 的车头间距分布情况,可以观察到随着 γ 的增大,交通流不稳定程度减小,表明在车流密度较小的情况下虚拟前车设想的位置越远,即驾驶员的侵略性越强,交通流更容易达到稳定状态.

为了考察在车流密度较大、车速较慢时的情况,在 (22) 式中取 $h = 3 \text{ m}$,图 6 是 $\gamma = 1.5$ 时,数值模拟仿真开始 10000 s 后车头间距的时空变化.可以观察到,交通流随着超车期望的增强由稳定态转变成不稳定态,且不稳定程度逐渐加大,在较大横向分离影响的情况下,交通流不稳定程度进一步加大,这与前面的稳定性分析结果相一致.图 7 和图 8 进一步表明在车流密度较大、车速较慢的情况下,横向分离和超车期望的越大,驾驶员侵略性越强,交通流不稳定程度也越严重.实际上这就解释了为什么在交通瓶颈处往往会发生车辆抢道超车而形成交通拥堵的情况.

从以上数值模拟实验的结果可以看出,横向分离和超车期望对于交通流的影响与交通流密度的大小有关:车流密度较小时,横向分离与超车期望能起到抑制交通堵塞的作用;但在车流密度较大的情况下,横向分离与超车期望反而使得交通流变得更加不稳定,这与实际的交通情况相符,表明该模型能有效地描述实际的宏观交通现象.

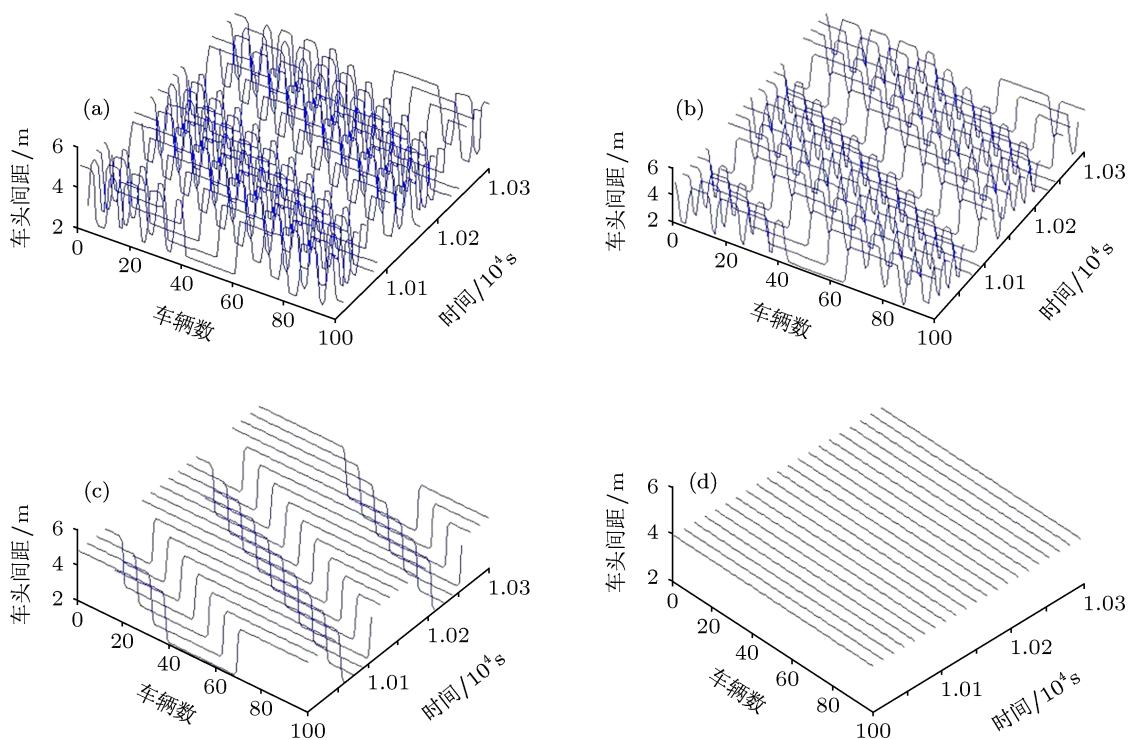


图3 仿真开始 10000 s 后车头间距时空变化 ($h = 4 \text{ m}$, $\gamma = 1.5$) (a) $p_n = 0, o_n = 0.1$; (b) $p_n = 0, o_n = 0.2$; (c) $p_n = 0, o_n = 0.3$; (d) $p_n = 0.3, o_n = 0.3$

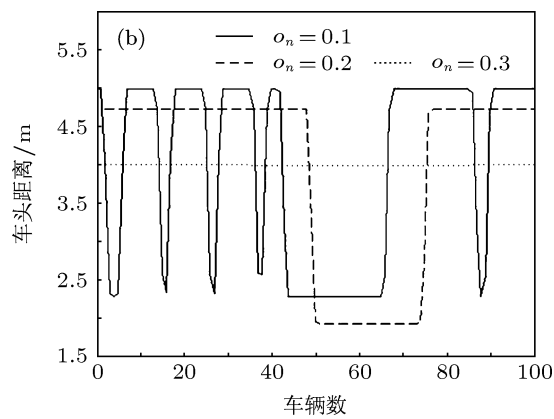
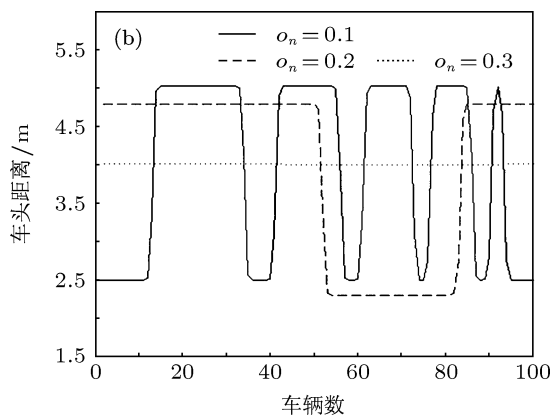
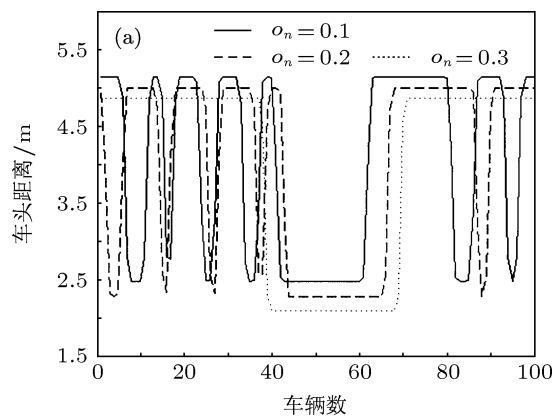
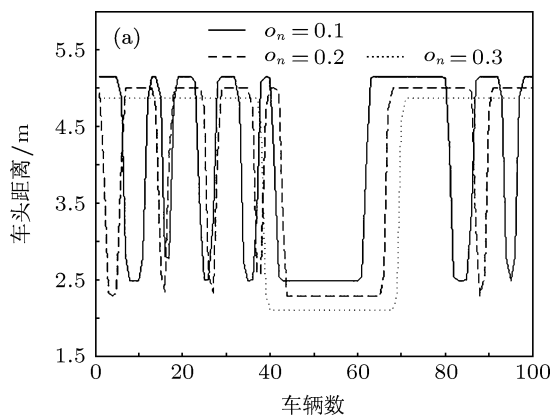


图4 仿真第 10000 s 的车头间距分布情况 ($h = 4 \text{ m}$, $\gamma = 1.5$) (a) $p_n = 0$; (b) $p_n = 0.3$

图5 仿真第 10000 s 的车头间距分布情况 ($h = 4 \text{ m}$, $p_n = 0$) (a) $\gamma = 1.5$; (b) $\gamma = 2$

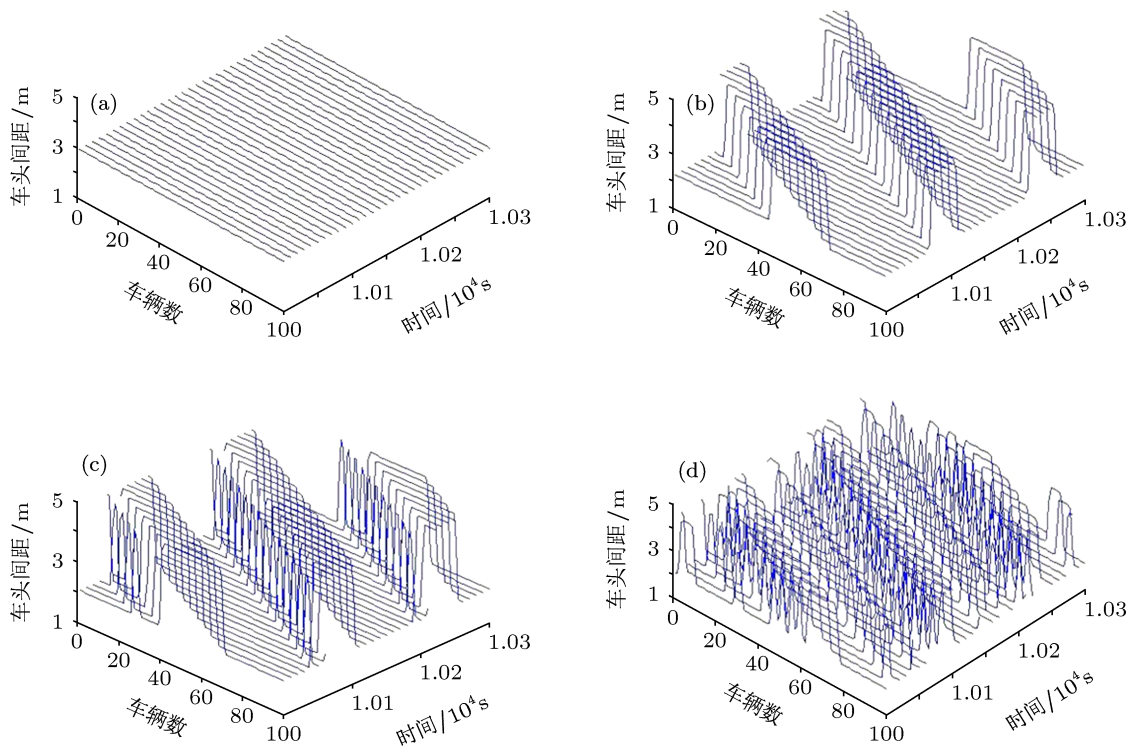


图6 仿真开始 10000 s 后车头间距时空变化图 ($h = 3 \text{ m}$, $\gamma = 1.5$) (a) $p_n = 0$, $o_n = 0.1$; (b) $p_n = 0$, $o_n = 0.2$; (c) $p_n = 0$, $o_n = 0.3$; (d) $p_n = 0.3$, $o_n = 0.3$

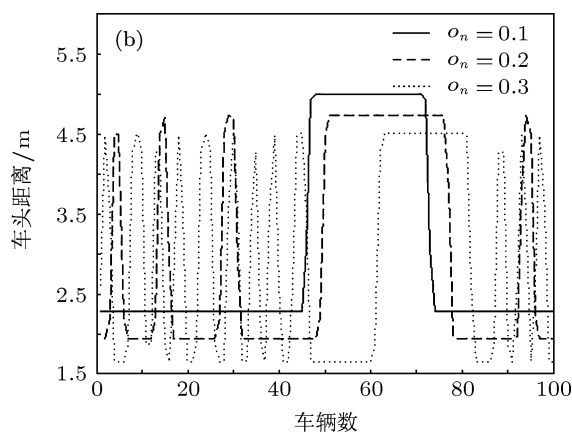
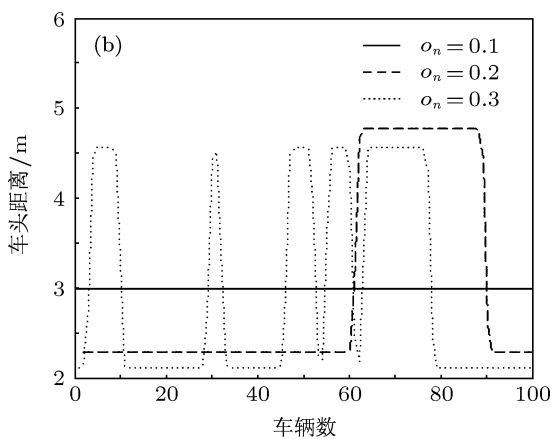
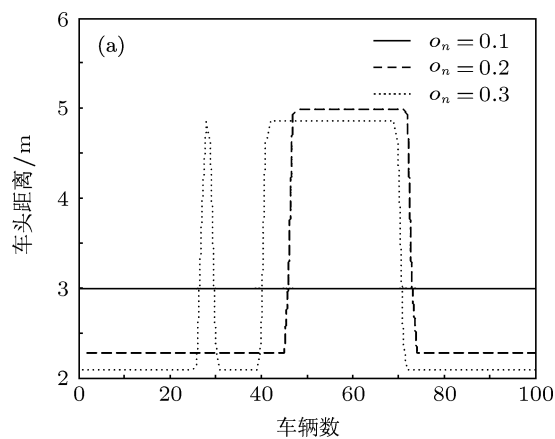
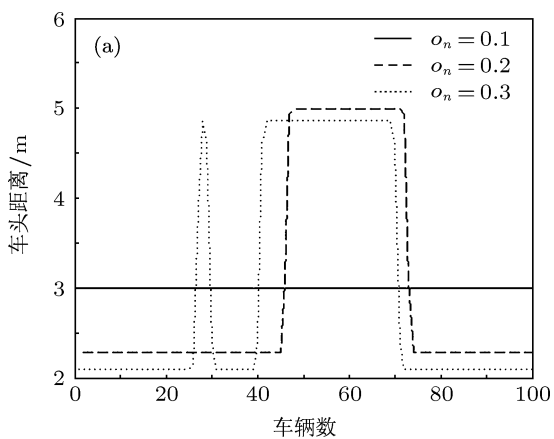


图7 仿真第 10000 s 的车头间距分布情况 ($h = 3 \text{ m}$, $\gamma = 1.5$) (a) $p_n = 0$; (b) $p_n = 0.3$

图8 仿真第 10000 s 的车头间距分布情况 ($h = 3 \text{ m}$, $p_n = 0$) (a) $\gamma = 1.5$; (b) $\gamma = 2$

5 结论

本文在 OV 模型的基础上, 通过引入横向分离参数和提出超车期望与虚拟前车的概念, 考虑了车辆横向分离与驾驶员超车期望对于车辆跟驰行为的影响, 提出了考虑横向分离与超车期望的车辆跟驰模型. 通过线性稳定性理论分析了模型的临界稳定条件, 发现横向分离越大, 对于驾驶员反应的要求降低, 交通流能在更高的密度下达到稳定; 虚拟前车的位置越远, 超车期望越高, 交通流也能在更

高的密度下达到稳定, 但是对于驾驶员反应的要求提高; 另外, 横向分离越大、超车期望越强、虚拟前车的位置越远, 在车流密度较小、车速较快时能增大交通流的稳定区域, 但在车流密度较大、车速较慢的情况下反而使交通流稳定区域减小. 数值模拟实验的结果进一步验证了稳定性分析结论. 由此可见, 为抑制交通拥堵, 在交通瓶颈处等交通流密度较大、运行缓慢的区域应该限制车辆的横向偏移和超车行为的发生. 下一步研究工作可以考虑加入速度差等交通流因素, 以进一步改进模型.

-
- [1] Reusch B 1950 *Oesterreichisches Ingenieur-Archiv* **4** 193
 - [2] Pipes L A 1953 *J. Appl. Phys.* **24** 274
 - [3] Newell G F 1961 *Oper. Res.* **9** 209
 - [4] Bando M, Nakayama A, Sugiyama Y 1995 *Phys. Rev. E* **51** 1035
 - [5] Komatsu T S, Sasa S 1995 *Phys. Rev. E* **52** 5574
 - [6] Bando M, Hasebe K, Nakanishi K, Nakayama A 1998 *Phys. Rev. E* **58** 5429
 - [7] Sugiyama Y, Yamada H 1998 *Traffic and Granular Flow'97* (Berlin: Springer)
 - [8] Berg P, Wilson E 2005 *Traffic and Granular Flow'03* (Berlin: Springer)
 - [9] Helbing D, Tilch B 1998 *Phys. Rev. E* **58** 133
 - [10] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 017101
 - [11] 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]
 - [12] Xue Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2750 (in Chinese) [薛郁 2003 物理学报 **52** 2750]
 - [13] Gunay B 2007 *Trans. Res. B* **41** 722
 - [14] Jin S, Wang D H 2010 *Physica A* **389** 4654
 - [15] Jin S, Wang D H 2011 *Trans. Res. Record* **2249** 7
 - [16] Jin S, Wang D H 2012 *Phys. Lett. A* **376** 153

A new car-following model considering lateral separation and overtaking expectation*

He Zhao-Cheng[†] Sun Wen-Bo

(*Research Center of Intelligent Transportation System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

(Received 5 November 2012; revised manuscript received 27 December 2012)

Abstract

In order to depict the real car-following behaviors better, in this paper we present a new car-following model by introducing the effect parameter of lateral separation distance and proposing the concepts of overtaking expectation and virtual front car based on OV model. The stability condition of the model is obtained by using the linear stability theory. It is found that with the increase of lateral separation and overtaking expectation, the stability region of traffic flow increases at a low density while it decreases at a high density. The results of numerical simulation verify the analytic results. Thus, in some places like traffic bottlenecks, which usually have a high traffic density, it is necessary to restrict the lateral movement and overtaking behavior of vehicles for suppressing the traffic jam.

Keywords: traffic flow, car-following model, lateral separation, overtaking expectation

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

DOI: 10.7498/aps.62.108901

* 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