

文章编号:1005-0523(2018)06-0072-09

# 考虑多车间距的跟驰模型及混合交通流的数值模拟

王 威, 吴 中

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 201198)

**摘要:**在OV模型的基础上,考虑了混合车流个体车辆对前方不同感知程度,建立了多车间距跟驰模型,对其稳定性进行了理论分析;在单一车队中混入考虑多车间距跟驰特性的车辆,可以显著提高车流稳定性,改善OV模型的加速度过大等缺点;将模型应用于混合车流的驾驶行为及交通流建模,就不同混合比和交通熵下的混合交通流中高速稳态与低速稳态之间的相互转化进行数值模拟,发现混合交通流中的交通波传递更快,加减速过程缩短,对交通拥堵也有一定的抑制作用,并且随着交通熵的增加,这一作用更加明显。

**关键词:**交通工程;跟驰模型;数值模拟;混合交通流;稳态演化

**中图分类号:**U491.1

**文献标志码:**A

数值仿真是交通流研究中的工具之一,表达非自由流状态下前后车辆之间相互作用的车辆跟驰模型,是研究微观交通流的重要方法,也是描述和揭示交通流状态变化规律主要理论依据。自1953年起,Pipes<sup>[1]</sup>采用动力学方法提出车辆跟驰行为的数学计算表达式,标志着车辆跟驰理论的诞生;通过对前人工作的总结,Newell等<sup>[2]</sup>(1961)考虑驾驶员跟驰行为存在的反应时间,提出了时滞跟驰模型,更加准确地描述跟驰车辆加速度改变的特性。Kikuchi等<sup>[3]</sup>(1992)提出了基于模糊逻辑的跟驰模型,在模型中增添了跟驰行为中的不确定因素,扩大了适用范围,也使多变量的控制模型更加高效。Bando等<sup>[4]</sup>(1995)通过优化速度函数体现出驾驶员根据车辆间距调整车辆最优速度的驾驶行为,提出了优化速度(OV)模型,解决了跟驰车辆加速度可变的问题,更好地解释复杂的车辆跟驰现象。因其综合了反应-刺激、加速度变化、考虑安全车间距和速度上限的优化速度等诸多跟驰因素,得到了包括交通物理学界在内的国内外学者的重视,并提出了一系列改进的OV类模型。Nagatani等<sup>[5]</sup>通过线性稳定性分析,获得模型的稳定条件以及模型的适应性。胡之英<sup>[6]</sup>改进了OV模型只考虑车辆间距因素对车辆跟驰行为影响的不足,在前导车加速度信息对后车行为影响的基础上,提出了改进模型,经数值模拟后发现模型可以有效抑制交通流的堵塞。周桐等<sup>[7]</sup>考虑了预估驾驶行为对车流的影响,提出了一种新的跟驰模型,并揭示了预估驾驶行为可以增强交通流稳定性能。

上述研究从不同角度挖掘了跟驰现象的内在特性规律,提高模型的准确性。但OV类模型大多建立在单一性质的交通流上,车流的稳定性分析较少考虑混合车流的跟驰行为的差异。在实际的混合车流中,由于大型车辆视野开阔,能感知前方多辆车距信息,车辆行为也会更多考虑前方多车的影响。因此,混合车流中大型车辆比例和相对位置会影响跟驰车辆的驾驶行为,也会影响车流稳定性。

本文考虑车辆对前方的不同感知程度,基于OV模型建立了考虑多车间距的跟驰模型,并推导了该模型的线性稳定性条件;同时对单一的peu交通流与混入多车间距跟驰特性车辆的混合车队进行启动和停止分

收稿日期:2018-05-31

作者简介:王威(1995—),男,硕士研究生,研究方向为运输规划与管理。

作者简介:吴中(1964—),男,教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理。

析,探究两类车队的速度与加速度变化过程;最后就混合交通流进行数值模拟,研究不同大车占比下的混合交通流稳态演化的过程。

## 1 跟驰模型

### 1.1 OV模型

Bando等提出的OV模型以车间距优化速度函数来描述跟驰车辆的加速度变化过程。模型的微分形式如下所示

$$\ddot{x}_n(t) = k [V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)] \quad (1)$$

其中: $k = \frac{1}{\tau}$ 为敏感系数; $\tau$ 为反应时间,s; $x_n(t)$ 为第 $n$ 辆车在 $t$ 时刻的车头位置; $\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - l_{n+1}$ 表示第 $n$ 辆车与前导车第 $n+1$ 辆车的车距,m; $l_{n+1}$ 为前导车的车长,m; $v_n(t)$ 表示第 $n$ 辆车在 $t$ 时刻的速度,m/s; $\ddot{x}_n(t)$ 表示第 $n$ 辆车在 $t$ 时刻的加速度,m/s<sup>2</sup>; $V(\cdot)$ 表示反应时间 $\tau$ 内跟驰车所能达到的优化速度,形式如下

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

其中: $v_{\max}$ 表示车辆的期望车速,m/s; $h_c$ 为跟驰车与前导车的安全车距,m。

### 1.2 考虑前方多车间距的跟驰模型

传统的OV模型只考虑了跟驰车与前车的车距,忽视更前方的车流状况。这使模型无法描述车队启动时,车间距很小后车仍然加速的交通现象。为了弥补传统OV模型的不足,本文考虑前方多辆车的车距的信息,建立基于多前车间距的跟驰模型<sup>[9-11,19]</sup>。模型表述如下

$$\ddot{x}_n(t) = k \{ V [ \sum_{j=1}^m \alpha_j \Delta x_{n+j-1}(t) ] - v_n(t) \} \quad (3)$$

其中: $n$ 为跟驰车的编号, $m$ 为考虑前方 $m$ 辆车的车头位置和间距; $\alpha_j$ 为影响系数,表示前方不同车辆间距对本车加速度的影响程度,显然邻近车辆车头间距对跟驰车的影响比次邻近车辆强,即有 $\alpha_j < \alpha_{j-1}$ ,并且满足归一化条件, $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1, \alpha_j > 0$ 。对于无法获得次邻近前车及其更远前导车信息的车辆情况,取 $m=1$ ,模型自然退化为OV模型。

影响系数定义为

$$\alpha_j = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{x_{n+j}(t) - x_n(t)}} \quad (4)$$

其中: $x_{n+j}(t)$ 为第 $n+j$ 辆车在 $t$ 时刻的车头位置。显然,前方车辆距离跟驰车辆越远,决策中其车距所占权重越小,对跟驰车加速度改变的影响也就越小。

### 1.3 稳定性分析

假设稳定的交通流中各车辆的车距均为 $b$ ,车辆的安全车头间距为 $h_c$ ,车辆长度为 $l$ ,反应系数均为 $k$ ,车流的稳定车速为 $V(b)$ ,均匀稳定车流车辆的车头位置可以表示为

$$x_n^0(t) = (b+l)n + V(b)t \quad (5)$$

对式(5)均匀稳定解,加上一个扰动解 $y_n(t)$ ,得到

$$x_n(t) = x_n^0(t) + y_n(t) \quad (6)$$

即有

$$y_n(t) = x_n(t) - x_n^0(t) \quad (7)$$

对式(7)分别求一阶和二阶导数有并代入式(3)中,有

$$\ddot{y}_n(t) = \ddot{x}_n(t) = k \left[ V \left( \sum_{j=1}^m \alpha_j \Delta x_{n+j-1} \right) - v_n(t) \right] = k \left[ V \left( b + \sum_{j=1}^m \alpha_j \Delta y_{n+j-1} \right) - V(b) - \dot{y}_n(t) \right] \quad (8)$$

根据 Taylor 一阶展开有

$$\ddot{y}_n(t) = k \left[ V'(b) \sum_{j=1}^m \alpha_j \Delta y_{n+j-1} - \dot{y}_n(t) \right] \quad (9)$$

其中:  $V'(b) = \left. \frac{dV(\Delta x_n)}{d\Delta x_n} \right|_{\Delta x_n=b}$ 。令  $y_n(t) = \exp(ia_k n + zt)$ , 将其按 Fourier 模变换<sup>[12-13]</sup>展开并代入式(9)中, 得到

$$z^2 + kz + kV'(b) \sum_{j=1}^m \alpha_j [\exp(ia_k j) - \exp(ia_k(j-1))] = 0 \quad (10)$$

令  $z = \lambda + \omega i$ , 代入式(10)得到

$$\lambda^2 - \omega^2 + k\lambda + kV'(b)\sigma_c + i[2\lambda\omega + k\omega - kV'(b)\sigma_s] = 0 \quad (11)$$

其中:  $\sigma_c = \sum_{j=1}^m \alpha_j [\cos a_k j - \cos a_k(j-1)]$ ,  $\sigma_s = \sum_{j=1}^m \alpha_j [\sin a_k j - \sin a_k(j-1)]$ 。

不考虑车辆跟驰时的侧向偏移, 在一维空间内考虑对车队的扰动, 令  $\lambda = 0$ , 即有

$$-\omega^2 + kV'(b)\sigma_c + i[k\omega - kV'(b)\sigma_s] = 0 \quad (12)$$

则式(12)左边的实部和虚部均为 0, 可以求得

$$V'(b) = \frac{k\sigma_c}{\sigma_s^2} = \frac{k \sum_{j=1}^m \alpha_j [\cos a_k j - \cos a_k(j-1)]}{\left\{ \sum_{j=1}^m \alpha_j [\sin a_k j - \sin a_k(j-1)] \right\}^2}$$

在  $a_k \rightarrow 0$  处, 利用等价无穷小代换及洛必达法则<sup>[17]</sup>得到临界稳定曲线

$$V'(b) = k \sum_{j=1}^m \alpha_j (2j-1)/2$$

那么稳定条件为

$$V'(b) < k \sum_{j=1}^m \alpha_j (2j-1)/2 \quad (13)$$

当  $m=1$  时, 模型退化为 OV 模型, 其稳定条件为  $V'(b) < k/2$ 。

对稳定条件(13)进行分析, 图 1 反映的是不同  $m$  值时模型的稳定曲线, 随着感知考虑前车数  $m$  的增大, 模型的稳定区域也随之变大, 即车辆可以在一定区域内稳定的行驶。这主要是因为模型考虑了更多前车的车距, 跟驰车在行驶过程中不仅考虑前导车的位置信息, 还考虑前方多辆车的位置信息, 降低了模型对于前导车速度波动的敏感性, 跟驰车速度的稳定性增强, 这与实际情况是相符合的。此外, 在  $m$  增加到一定值的情况下, 稳定区域的变化减小, 可以预见, 稳定区域将趋于一固定区域, 表明过多的考虑前车车距对于模型的改进效果意义不大。

对于单一曲线来说, 敏感系数  $k$  值越大, 即反应时间  $\tau$  越小, 对应的稳定区域越小。这表明: 驾驶员的反应时间越小, 交通流趋于稳定; 如果反应时间较大, 交通流的不稳定性增加, 受前方车速波动影响较大。

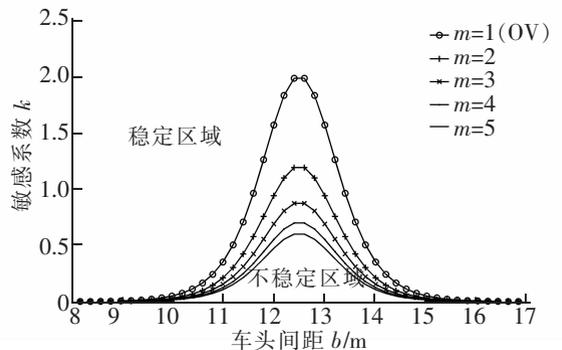


图 1 模型考虑不同前车数的临界稳定曲线  
Fig.1 The critical stability curves of the model considering different number of vehicles

## 2 单一 OV 跟驰特性车队与混合车队的实例分析

为了研究车队中部分车辆的跟驰特性不同对车流稳定性的影响,本节选取 7 辆车进行单车道车辆跟驰模拟,对比只有单一 OV 跟驰特性车辆的车队和混入多车间距跟驰特性车辆时车队在启动和停止时的车速变化情况。模拟过程中,首先对前导车进行速度突变(刹车或起动),观察车队演化情况;然后对车队中第 4 和第 5 辆车分别为 OV 跟驰特性和多车间距跟驰特性时进行数值模拟,分析后续车辆对前导车速度变化的反应以及达到稳定状态的过程。

### 2.1 起动过程

在模拟车队的启动过程时,车队初始状态为密集排列的静止车队,对应于现实中交叉路口的排队车辆。在第 10 s 时头车开始起动,加速度为  $5 \text{ m/s}^2$ ,加速至  $5 \text{ m/s}$  后保持匀速运动。

如图 2 所示为起动过程中单一 OV 跟驰特性车队和混合车队中第 4 辆车、第 5 辆车的速度与加速度变化情况。在头车起动过程中,后车起动相较其有一定的时滞效应,这主要是由于起动波的传递需要时间,车辆需要按照与前车之间的间距进行跟驰行为决策。而图中所示,混合车队中的第 4 辆、第 5 辆车起动要略快于单一车队,多车间距模型考虑了车辆视野的广阔性,对前方车辆间距感知更全面,对前方车速变化也就更加敏感,使得混合车队中的第 4 辆车更加快速的起动,而 OV 模型则是根据前方一辆车的间距进行驾驶行为决断,前车的早发性势必会带来后车的更快起动,由此来推断,混合车队第 4 辆车后的车辆起动也快于单一车队。

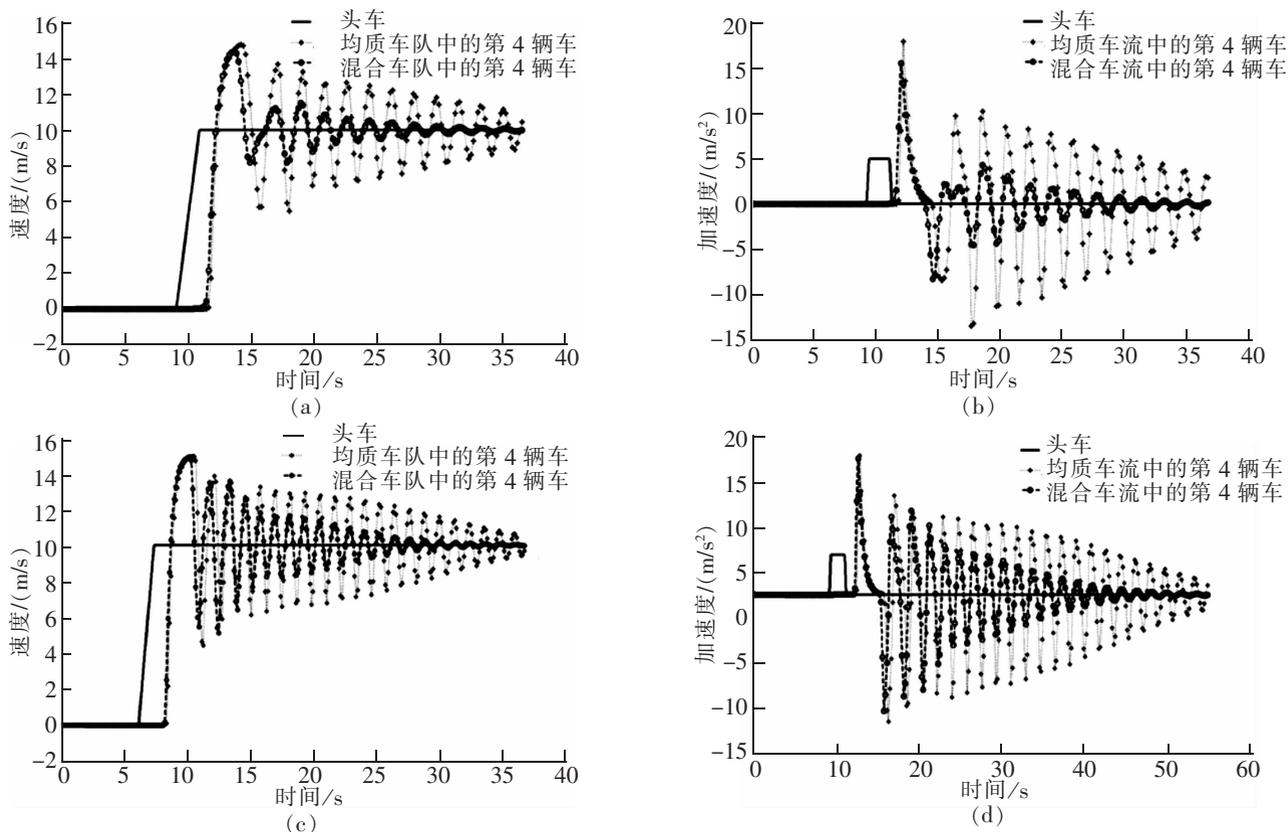


图 2 起动过程车队中车辆速度与加速度变化情况

Fig.2 Speed and acceleration change of vehicles in starting process

### 2.2 停止过程

在模拟车队的停止过程时,车队初始状态为车速为  $10 \text{ m/s}$  的稳定状态,在第 10 s 时头车开始刹车,减速度为  $5 \text{ m/s}^2$  直至速度为 0,这对应着现实中车队因前方道路交通事故或其他突发事件而带来的突然停车。

如图3所示的是减速过程中车队中第4辆车和第5辆车速度与加速度变化情况。与起动过程相似,停止过程中混合的车辆对减速的反应更快,延迟更小。而在图3(a)、图3(c)中可以看出,混合车队中的第4、第5辆车的减速过程要比单一车队中略长,相应的在图3(b)、图3(d)中也可以体现混合车流中的最大减速度要更小,这一现象表明混入多车间距跟驰特性车辆的车辆的车队改善了OV模型加速度、减速度过大的缺点,平缓了减速过程,从而减小了车速波动,增强了车流稳定性。

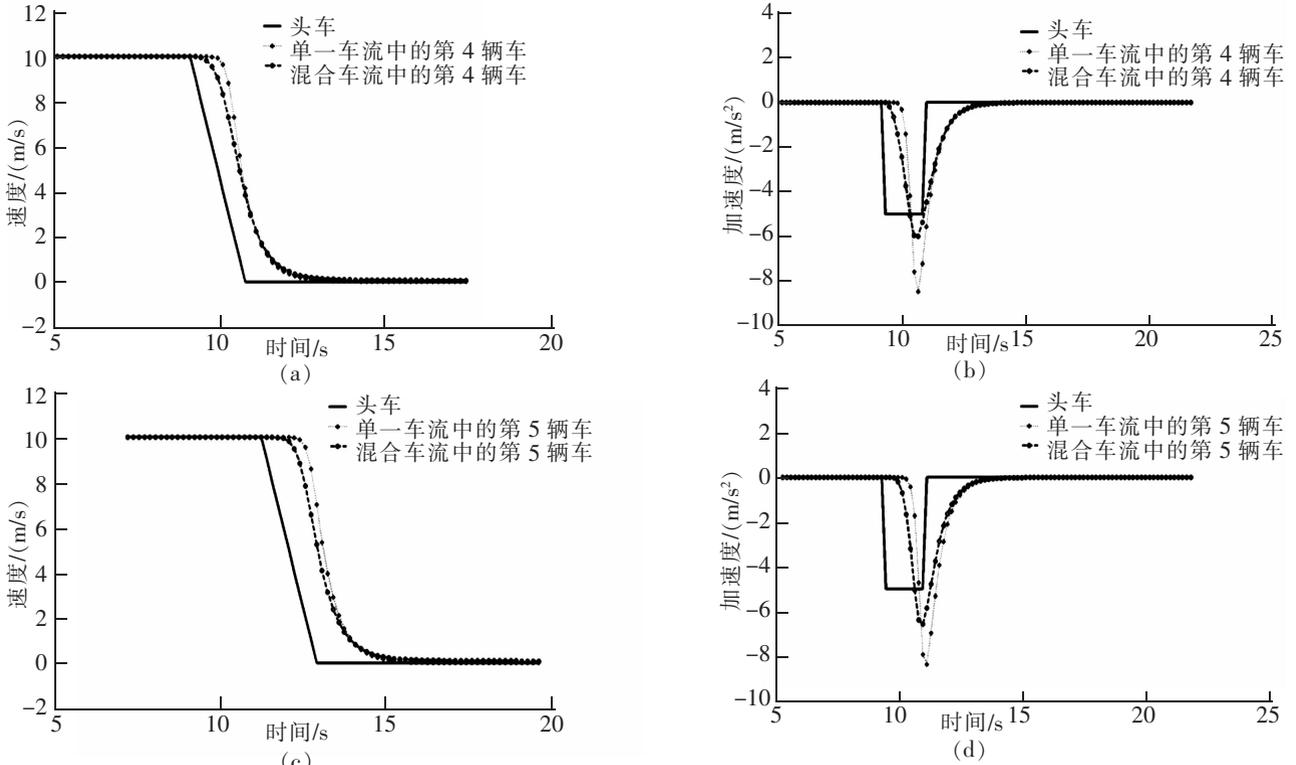


图3 停止过程车队中车辆速度与加速度变化情况

Fig.3 Speed and acceleration change of vehicles in stopping process

### 3 混合交通流的数值模拟

#### 3.1 交通熵原理

熵是表征系统内无序状态出现概率大小的物理量,交通系统与热力学系统有着相似之处,可以用熵来描述<sup>[18]</sup>。从熵的角度来考量混合交通流,车型种类越多,在混合交通流中排列组合的方式就越多;任一车型的车辆数占交通量的比例越大,他们的概率分布也就越大,排列方式的对数平均值等于各种车型的概率分布,可以得到交通熵表达式为

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (14)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n p_i = 1, p_i \geq 0$$

式中: $H$ 为交通熵; $p_i$ 为*i*种车型当量交通量在混合交通流当量交通量中所占比例; $n$ 为车型数。

当车队只有单一车种时,其熵值最小 $H=0$ 。

考虑大车、小车两种车型的混合交通流,对只有两种车型的混合交通流进行熵值分析,取大车转化为标准小车的换算系数为1.5,求得交通熵 $H$ 与大车比例 $p$ 的关系式如下

$$H = - \left[ \frac{1.5p}{1-0.5p} \ln \left( \frac{1.5p}{1-0.5p} \right) + \frac{1-p}{1-0.5p} \ln \left( \frac{1-p}{1-0.5p} \right) \right] \quad (15)$$

根据表达式可以绘制交通熵  $H$  与大车比例  $p$  的关系图如图 4 所示。可以看出,交通熵的熵值随着大车比例的增加而增大,在比例接近 0.5 时达到最大值,随后逐渐减小,交通熵与大车比例的图像并不对称。

### 3.2 不同大车占比下的混合交通流模拟

根据上述的研究发现,多车间距跟驰模型相较于 OV 模型考虑了更多前车的信息,司机可以根据前方的车辆运行状况及早做出反应,控制当前车速;在混入多车间距跟驰特性车辆的混合车队中,不同类型车辆对前方交通状况的感知程度不同,感知程度较强的车辆使得车流稳定性显著提升。

为了直观全面的分析感知程度不同的两种车辆组成的混合交通流的车流稳定性,这里对大型车辆占比不同的混合车流以作对比试验,在开放边界条件下,研究不同大车占比和交通熵值下的混合车流的稳态演化情况<sup>[7-8,14,16]</sup>。

模型参数设置如下:车辆总数  $N=100$ ,敏感系数  $k=1.4 s^{-1}$ ,期望车速  $v_{max}=20 m/s$ 。模拟中,普通车辆采用 OV 跟驰特性,大型车辆采用多车间距跟驰特性,假设不同类型车辆均匀分布在车队中,忽略车辆长度的影响,仅限于研究两种跟驰特性车辆的混合车流的交通行为。模拟过程中,首先对头车进行加速或减速达到速度变化的效果;然后在初始情况下分别对大型车辆占比为  $p=0,0.1,0.25,0.5,0.75,0.9,1$  时的混合车流进行数值模拟。

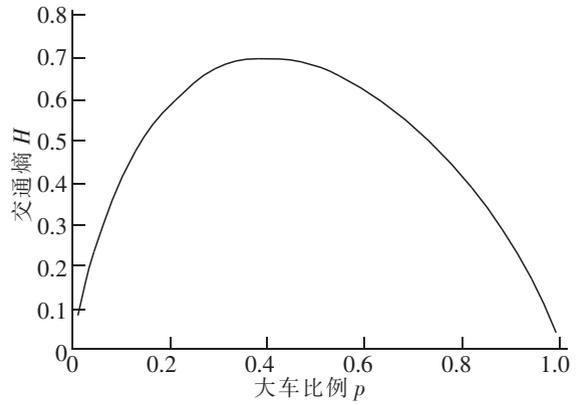


图 4 不同大车比例下的交通熵熵值图  
Fig.4 Traffic entropy pattern of different cart proportions

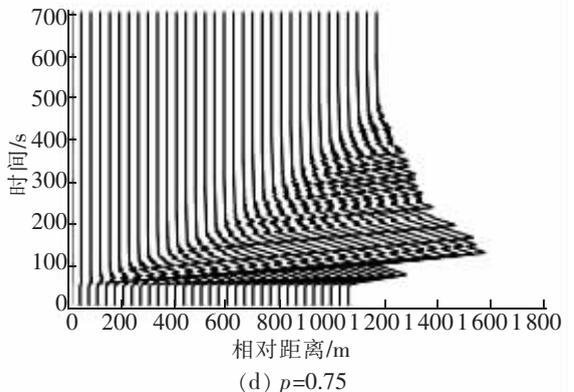
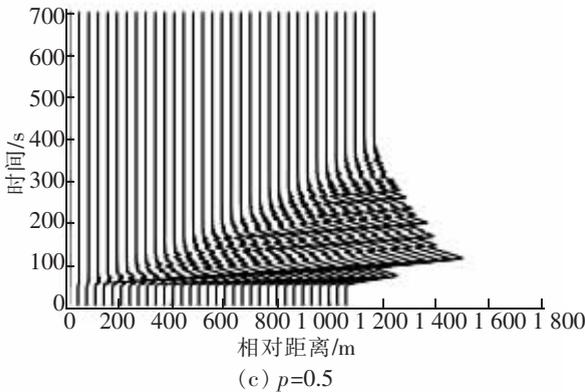
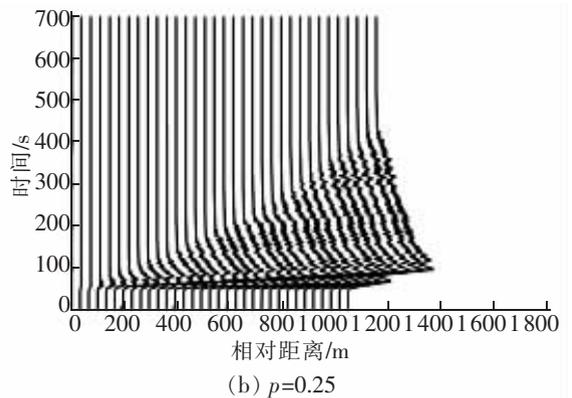
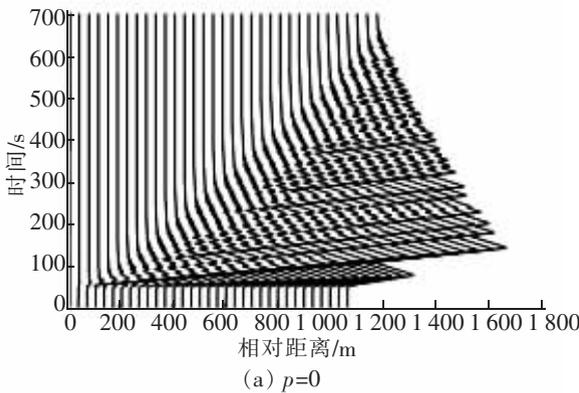


图 5 不同大车占比下由  $v=5 m/s$  稳态向稳态  $v=15 m/s$  演化的时空分布图

Fig.5 Temporal and spatial distribution pattern of steady state evolution from 5 m/s to 15 m/s with different cart proportions

如图5所示的不同混合比下车流由 $v=5\text{ m/s}$ 的稳态向 $v=15\text{ m/s}$ 的稳态转移过程中时空分布图。在从低速稳态向中高速稳态的演化过程中,需要经过加速过程和稳定过程;由于交通波的传递需要时间,车辆在加速过程中,后续车辆加速要明显慢于前方车辆,导致车队在前方车辆完成加速后变长,当后续车辆开始加速时,车队又逐渐变短;在完成加速后,车队经过一段时间的稳定过程,达到稳定状态。

当大车占比为0.5时,混合车队的交通熵最大,其加速和稳定过程所需的时间最短;而当车队为单一的车队时,交通熵最小,加速和稳定过程的时间最长。随着交通熵的增大,车队的稳态演化所需的时间逐渐缩短,体现在车队完成加速后的稳定过程的缩短,说明了交通熵越大,稳态转化越快速平稳,车队的稳定性越强。

如图6所示的不同交通熵下车流由 $v=15\text{ m/s}$ 的稳态向 $v=5\text{ m/s}$ 的稳态转移过程中时空分布图。在中高速稳态向低速稳态的演化过程中,车流需要经过减速过程和稳定过程,减速波由前车向后车进行传递,后车减速行为相较于前车有一定的时间延迟。在单一车流中,车流在减速过程中,由于减速波传递过慢,后车在减速时,前车已经完成减速,此时车距已经很短,需要进行急刹车,很容易带动后续车辆陷入拥堵,当前车完成减速后,拥堵车队开始疏散;而在混合车流中,大型车辆可以更早的了解到前方的减速信息,加快减速波传递,加快整个车队的减速过程。随着交通熵的增大,车队的减速过程愈加平缓,且车流陷入拥堵的阈值降低。这一结果表明:在中高速稳态向低速稳态演化的过程中,混合车流中的大型车辆可以加快减速波的传递,缩短稳定过程,抑制交通拥堵,随着交通熵的增加,对交通拥堵的抑制作用越明显。

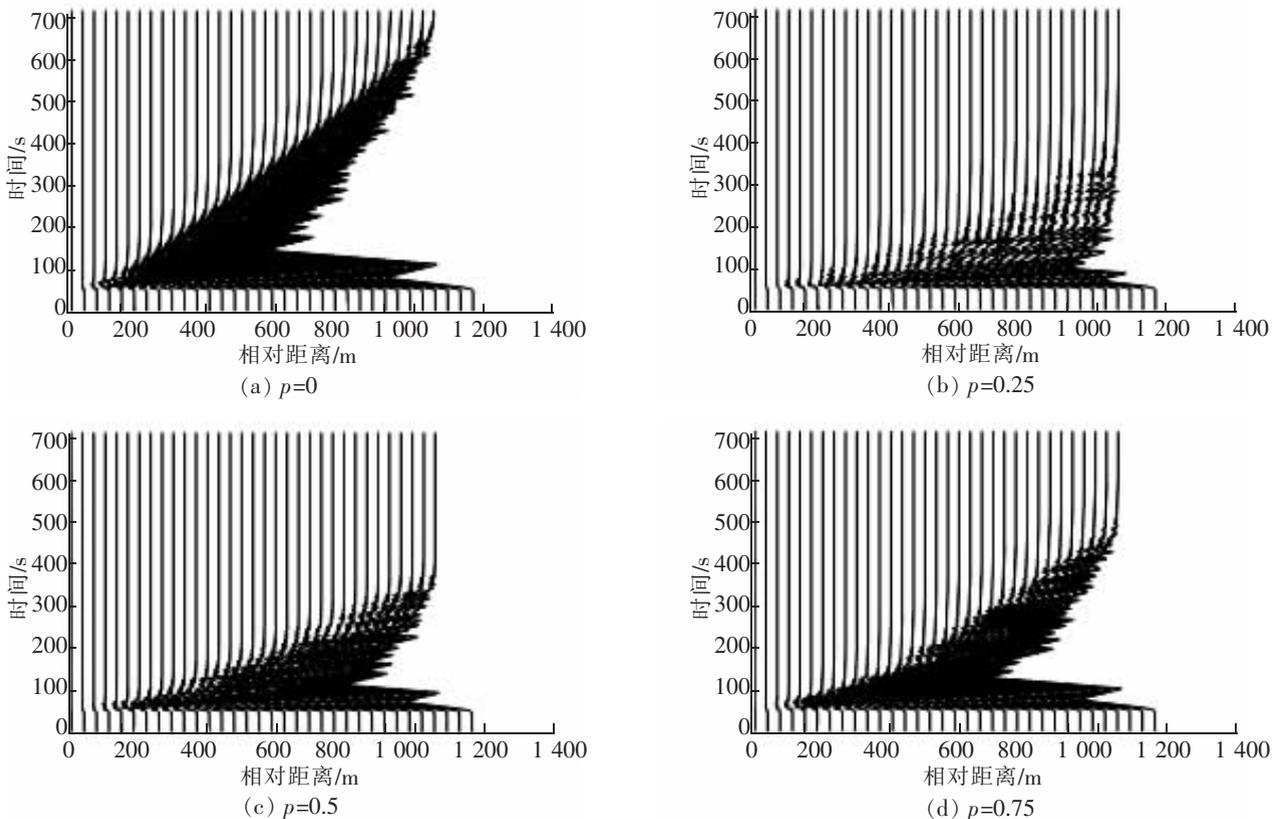


图6 不同大车占比下由 $v=15\text{ m/s}$ 稳态向稳态 $v=5\text{ m/s}$ 演化的时空分布图

Fig.6 Temporal and spatial distribution pattern of steady state evolution from 15 m/s to 5 m/s with different cart proportions

随着大型车占比的增加,车辆的稳态演化的过程先缩短后增加,这主要是由于车队中大型车较少时,其感知到的前方车况更全面,而模型本身在考虑前方车辆较多时对车流稳定性改善不大,使得后续车辆更早的进行加速,大车数量对车流的稳态演化影响更大;而大型车增加到一定比例时,相互之间的干扰也逐渐增大,大型车所感知到的前方车况较少,其本身驾驶决策时考虑的前方车辆数较少,考虑车距数的减少会显著

降低车流的稳定性,稳态演化过程中受到模型考虑前方车辆数的影响更大。仿真结果表明了稳态演化过程和大车比例的关系与交通熵是吻合的,交通熵越大,车流稳态演化的过程更小。

此外,在车流稳态演化的过程中,会产生交通波<sup>[15]</sup>,如图7所示的是车队在演化过程中交通波与大车比例的关系图。图7中可以看出,混合车流的交通波要大于单一的小车车队或者大车车队,当大车占比为0.1时,交通波的传递速度最快,这主要由于大车占比较低时,大车可以看到前方更多的车辆信息,司机可以更快的做出反应;而当大车占比增加时,大车同样受到前方大车的视线遮挡,所能感知到的路况信息反而会减小,减小交通波的传递速度。对比同样大车占比的车队,加速波的传递速度总是大于减速波的,这主要是由于中高速稳态时的车辆间距大于低速稳态,车辆总希望保持较快的车速行驶。

数值模拟的结果表明:相比较于单一的普通车流,混合交通流在稳态演化的过程中,交通波的传递更快,加减速过程及稳定过程更短;而随着交通熵的增大,混合交通流在通过交通瓶颈时,车队的减速过程更加平缓,可以有效的抑制拥堵现象的产生。

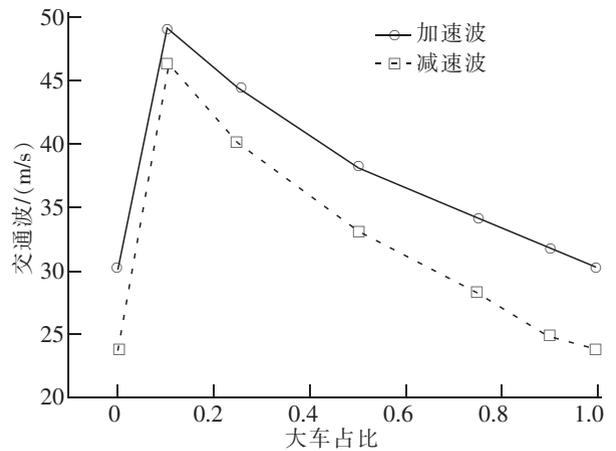


图7 不同大车占比下的交通波

Fig.7 Traffic wave of different cart proportion

#### 4 结语

本文基于OV模型,建立了考虑前方多车间距的跟驰模型,并讨论了其稳定性条件;通过数值模拟的方式对混合车队和单一车队对进行启动与停止分析;同时混合车流的稳态演化进行数值仿真,分析了混合交通流的稳态演化过程。研究表明:多车间距跟驰模型的稳定性优于OV模型,并且随着考虑前方车距数量的增加稳定性随之提升;混入多车间距跟驰特性车辆的车队车速波动更小,稳定性强于单一车队,多车间距跟驰模型有一定的致稳作用;在混合交通流稳态转移的过程中,考虑多车间距跟驰模型可以加快交通波的传递,缩短车流的加减速过程,对交通拥堵也有一定的抑制作用,并且随着交通熵的增大,这一作用更加明显。

上述结论对进一步研究跟驰模型以及混合交通流的稳定性有一定的参考价值。在研究中,对混合交通流的抑制拥堵作用的分析仅限于均匀分布的混合交通流,还需进一步考虑其他不同分布下的交通流特性。

#### 参考文献:

- [1] PIPES L A. An operational analysis of traffic dynamics[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(3): 274-281.
- [2] NEWELL G F. Nonlinear effects in the dynamics of car following[J]. Operations Research, 1961, 9(2): 209-229.
- [3] KIKUCHI S, CHAKROBORTY P. Car-following model based on fuzzy inference system[J]. Journal of the Transportia Record, 1992(1365): 82-91.
- [4] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(2): 1035.
- [5] NAGATANI T, EMMERICH H, NAKANISHI K. Phase transition in a difference equation model of traffic flow[J]. Journal of Physics A General Physics, 1998, 31(24): 5431-5438(8).
- [6] 胡之英. 考虑前车加速度信息的跟驰模型及数值模拟[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(11): 47-49.

- [7] 周桐,郑林江,刘卫宁. 考虑预估驾驶行为的跟驰模型及其稳定性分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2016,39(6):141-147.
- [8] 孙棣华,李永福,田川. 基于多前车位置及速度差信息的车辆跟驰模型[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(7):1326-1332.
- [9] 王涛,高自友,赵小梅. 多速度差模型及稳定性分析[J]. 物理学报,2006,55(2):634-640.
- [10] WHITHAM G B. Exact solutions for a discrete system arising in traffic flow[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1990,428(1874):49-69.
- [11] 华雪东,王炜,王昊. 考虑车与车互联通讯技术的交通流跟驰模型[J]. 物理学报,2016,15(1):44-55.
- [12] 马知恩,周义仓. 常微分方程定性及稳定性方法[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [13] 王联,王慕秋. 非线性常微分方程定性分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1987.
- [14] JIANG R, WU Q, ZHU Z. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2001,64(1 t 2):017101.
- [15] 张晋. 基于元胞自动机的城域混合交通流建模方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [16] ZHOU T, SUN L H, Li H M, et al. A new coupled map car-following model considering drivers' steady desired speed[J]. Chinese Physics B, 2014,23(5):41-45.
- [17] 裴礼文. 数学分析中的典型问题与方法[M]. 北京:高等教育出版社,1993.
- [18] 李松,贺国光,张晓利. 一种基于交通熵的交通流无序度量方法[J]. 公路交通科技,2007,24(11):92-95.
- [19] 徐良杰,刘志. 基于车道选择的交叉口进口道导向系统改善方法[J]. 华东交通大学学报,2018,35(1):14-19.

## Car-Following Model in View of Multiple Distances and Numerical Simulation of Mixed Traffic Flow

Wang Wei, Wu Zhong

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the OV model, this study, by taking into account individual vehicles' perception of the road ahead in the mixed traffic flow, established a car-following model of multiple distances and analyzed its linear stability theoretically. The platoon, mixed with the vehicles of multi-distance car-following characteristics, is more stable and the large acceleration in OV model can be improved. It applied the car-following model of multiple distances into the modeling of driving behaviors and traffic flow in mixed traffic flow. The numerical simulation was demonstrated to study the mutual transformation between high-speed steady state and low-speed steady state in the mixed traffic flow with different cart proportions and traffic entropy. The research results show that the traffic wave in the mixed traffic flow spreads faster and the time of acceleration and deceleration is shortened, which, to a certain degree, can alleviate traffic congestion. It maintains that with the increase of traffic entropy, traffic congestion becomes less and less obvious.

**Key words:** traffic engineering; car-following model; numerical simulation; mixed traffic flow; steady state evolution