

# 单通道高速公路车流的相互作用力模型研究

张建玮<sup>1,†</sup> 邹燕<sup>2</sup>

(1 北京大学物理学院 北京 100871)

(2 西南财经大学会计学院 成都 610074)

**摘要** 交通流的研究对于城市化进程非常重要. 文章以一个实际例子, 阐明了交通物理学研究的主要方式. 从交通动力学中的车辆跟随模型出发, 综合交通流中车辆依据道路交通情况来调整车辆的运行, 以保持安全前提下的一个较快的速度和合适的车辆间距, 建立了适用于单轨道高速公路的相互作用力的微观模型. 在单轨道交通条件下, 通过解析和数字模拟两种方法来研究该模型的平衡解, 并讨论了其在微扰下的稳定性. 同时, 文章还试图模拟一些已知的交通相, 并通过与实际交通现象中的一些特征比较来说明其可行性. 此外, 还通过建立相应的宏观流体力学模型, 与微观模型进行比较, 并肯定了其适用性.

**关键词** 交通动力学, 交通流, 平衡态的稳定性, 畅通态, 拥塞态, 堵塞态

## An acceleration model for single-lane highway traffic

ZHANG Jian-Wei<sup>1,†</sup> ZOU Yan<sup>2</sup>

(1 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 School of Accounting, South Western University of Finance and Economics, Chengdu 610074, China)

**Abstract** Traffic flow is a very important issue in urbanization. Based on the goal of greater speed with less distance between vehicles while maintaining safety, we propose an acceleration model for single-lane highway traffic. Using linear analysis and numerical simulation, we analyze the equilibrium state solution and its stability under certain perturbations. Several known traffic phases, such as the free, congested, and jam states, are simulated numerically and compared with realistic situations. The applicability of this model is demonstrated through comparison with its related macroscopic model.

**Keywords** traffic dynamics, traffic flow, equilibrium stability, free traffic state, congested state, jam state

### 1 引言

交通动力学<sup>[1-5]</sup>是近年来一个倍受关注的交叉科学研究热点, 从上个世纪 90 年代初到现在, 每年都有近百篇文章在国际一流刊物上发表. 追溯这门学科的历史, 发现最早的相关文献来源于 1934 年对当时高速公路的调查报告<sup>[6]</sup>. 当时就预见到, 随着工业化进程的发展, 汽车将进入到越来越多的寻常百姓家中, 带来的一个直接后果就是交通情况的日益恶化. 现在看来这种担心并不是多余的, 到 50 年代中期的时候, 美国高速公路的车流量已经大大超过了道路的正常承受能

力, freeway 不再是“free” way, 而 highway 似乎也应该称之为 low-speed way. 同时, 车辆增多而带来的环境污染也引起了人们的广泛关注. 在这样一种时代背景下, 人们对交通问题的研究越来越重视, 经济学家、物理学家和应用数学家也加入到了这个研究领域当中, 发展了一些至今仍然在使用的研究方法, 如描述车辆密度与车流量关系的基本图表法 (fundamental diagram)

2010-01-11 收到初稿, 2010-01-22 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: james@pku.edu.cn

等<sup>[7,8]</sup>.但是,由于当时各国政府的关注程度不够,没有投入足够的经费用于有关道路情况数据的采集,因而限制了理论的发展,没有取得较多有意义的成果.

随着经济的进一步发展,公路交通的恶化已经成为各国政府心中挥之不去的阴影,像纽约和芝加哥这样的大城市,在旅游旺季甚至出现过绵延数百公里的交通堵塞.在各大汽车公司的大力支持下,西方各国政府终于设立了专项拨款用于交通数据的采集,不仅纪录了不同时段的车流量、车辆密度等数据,同时还对不同类型的车辆建立了专项的数据库.其中又以荷兰等欧洲国家做的工作最为出色.这些有效措施给理论研究注入了新鲜的血液,大量文献在各种期刊上不断涌现,人们开始细致地研究交通运行过程中出现的各种现象,并把其归为不同的相,进而构建出合适的模型以研究其相变特征.这些研究将有助于道路布局和交通调度的改进,从而改善严重的公路交通状况.

一个高效率的交通系统对于保障和推进现代化国民经济的发展起着至关重要的作用.中国现今的交通情况虽然比西方发达国家要好些,但是随着人民生活水平的日益提高,加上加入世界贸易组织以后汽车价格的全面下调,在中国,特别是经济较为发达的大中城市必将面临和西方发达国家类似的交通问题.此外,中国的道路交通环境和人们的交通行为习惯具有一些新的特点.因而在我国进行交通动力学的研究乃至由此提出相关管理方面建议是相当必要的.

交通流是一个具有较强相互作用的多体系统,其中蕴含了丰富的非线性现象,比如交通堵塞<sup>[9]</sup>、走走车流(stop-and-go traffic)<sup>[10]</sup>以及同步态(synchronized congested traffic)<sup>[11,12]</sup>等.研究交通流的主要方法有5种:微观车辆跟随模型(microscopic car-following models)、介观动态气体模型(meso-scopic gas-kinetic models)、宏观车辆流体模型(macroscopic fluid models)、元胞自动机(cellular automata)和从主方程出发的统计学方法.尽管对一些看似有比较可靠结论的交通动力学理论,近年来仍有不少学者提出了疑问和挑战<sup>[13,14]</sup>.在这些研究交通流的方法之中,微观车辆跟随模型(以下简称为微观模型)的发展最为成熟,而且近来在其框架下又提出了不少新的模型和改进意见<sup>[15-26]</sup>.本文拟就一个实例来具体反映源自宏观模型框架的,研究微观车辆模型的基本思路.

## 2 交通动力学方程

车辆跟随的微观模型中的基本假设是基于车流中的每一个司机都按照一个统一的模式对可能出现的各种交通情况做出反应,通常这种反应是通过车辆的加速度或与之等效的瞬时速度来表示,可以容易得到相应的动力学方程.在这个基本假设下,许多作者采用了两类规范来避免碰撞的发生.第一类是在相邻车之间保持合适的安全距离,这个距离是两车瞬时相对速度或某一极限速度的函数;另一类是让每一辆车保持一定的安全速度,而该速度是该车与前一辆车瞬时距离的函数.当司机对路况做出反应时,他或她会同时考虑到自己车的速度和与其他车之间的距离.这两个因素不存在必然的相互依赖的函数关系,因而本文将上面这两种规范结合在一起,在加速度的具体形式<sup>[23]</sup>上得到反映.

除了上述的两个微观模型基本假设之外,为了方便起见,还有必要指出另外两条隐含的假设,即车流中的所有车辆具有相同的长度,并且所有司机对各种情况做出反应的敏感度都一样.

设 $v_0$ 为交通舒畅时车辆的平均速度,即平均速度的最大值.它可以从某条公路的具体数据得到.当该公路上某车的速度小于 $v_0$ 时,该车的司机在道路情况允许的前提下将加速以节约时间.反之,则他会减速以防止碰撞.因而可以在加速度的表达式中加入一项 $a_0(1-v/v_0)$ 来表示这种关系.另一方面,取相邻车辆间的安全距离 $\xi$ 的形式为 $\xi(v) = (\tau v)^\sigma$ , $\tau$ 和 $\sigma$ 表示司机的总体响应强度(当 $\sigma=1/2$ 时, $\tau$ 的量纲为 $[T][L]$ )和响应指数.

在大多数情况下,在前面有车时,特别是两车靠得很近的时候,后面的车辆趋向于控制自己的速度.这可以理解为前面的车辆对后面的车辆有一个排斥作用,因而可以用函数

$$U(s, v) \propto \frac{1}{4} \left[ \frac{\xi(v)}{s} \right]^4 + \frac{\xi(v)}{s} \quad (1)$$

来表示,它可以看成瞬时的相互作用势函数.其中 $s$ 为相邻车辆的间距.需要指出的是,这个排斥作用的函数形式并非是唯一的选择.同时,这样的函数及其参数选择的原则是在尽可能简单的情况下符合实际交通状况中尽可能多的特性.

这样,就得到了下面的加速度方程:

$$a(s, v) = f(s, \xi) + a_0 \left( 1 - \frac{v}{v_0} \right) \quad (2)$$

其中

$$f(s, \xi) = -\frac{\kappa}{s} \left[ \left( \frac{\xi}{s} \right)^4 + \frac{\xi}{s} \right], \quad (3)$$

这里  $\kappa$  代表引言中提到的两种规范的相对强度,  $a_0$  的物理含义是车辆从静止开始加速的加速度, 为了方便与实际数据比较, 用车辆的密度  $\rho = \frac{1}{s}$  将加速度的表达式改写为

$$a(\rho, v) = -\kappa\rho[(\xi\rho)^4 + \xi\rho] + a_0\left(1 - \frac{v}{v_0}\right). \quad (4)$$

由(4)式表示的车辆的加速度和速度的定义, 可得  $\frac{d\rho}{dt} = \rho^2(v - v_{pre})$ , 从而构成了车辆在道路行驶中的运动方程, 其中  $v_{pre}$  表示前车的行驶速度.

### 3 平衡态及其稳定性分析

交通动力学中平衡态是指车流的速度和密度均不随时间变化的态, 即

$$\frac{dv}{dt} = a(\rho, v) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho^2(v - v_{pre}) = 0. \quad (6)$$

从(5)式和(6)式可以得到两组平衡解: 第一组是  $\rho=0$  和  $v=v_0$  的平凡解, 实际上这就是  $v_0$  的定义, 即以  $\rho=0$  为极限的畅通态时的车流速度; 另一组解为  $v=v_{pre}$  和

$$\omega^5 + \omega^2 - c = 0, \quad (7)$$

其中  $\omega \equiv \xi\rho, c \equiv \frac{a_0}{\kappa} \left(1 - \frac{v_{pre}}{v_0}\right) (\tau v)^\sigma$ .

容易看出, 只有当  $v_{pre} < v_0$  时(7)式才有解. 这是非常自然的, 因为此时不存在一个车流速度大于  $v_0$  的平衡态, 这也反映了  $v_0$  的物理意义.

将(7)式的平衡解以及实际的数据画在图1中. 这组数据是从文献[2]中摘录的, 其来源是荷兰某高速公路平衡态时的车流密度-速度曲线. 从图中可以看到, 模型和实际数据符合得很好. 这里具体代入的参数值为:  $v_0 = 110\text{km/h}, a_0 = 3\text{m/s}^2, \kappa = 38\text{m}^2/\text{s}^2, \tau = 8 \times 10^{-6} \text{km} \cdot \text{h}, \sigma = 0.5$ .

使用线性稳定性分析方法分析(5)式和(6)式非平凡解的稳定性, 需要设定一个均匀分布的初始条件为:  $N$  辆速度为  $v^{(0)}$  的车辆沿着一个长度为  $L$  的轨道运行, 车辆的间距  $s^{(0)}$  是  $v^{(0)}$  所对应的平衡距离, 并且  $L = Ns^{(0)}$ . 利用周期性的边界条件, 这相当于所有车辆在一个环形轨道上运行. 注意到边界条

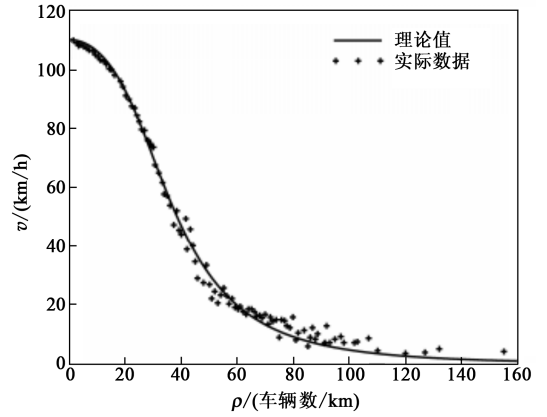


图1 一组平衡态时的车流密度-速度曲线的实际数据和理论模型拟合曲线

件的选取并不影响最后得到的结果, 特别是在  $N$  非常大的时候<sup>[15]</sup>.

当第  $n$  辆车与前一辆车的距离  $s_n$  稍稍偏离  $s^{(0)}$  时, 如果经过一段时间这种偏离趋于零, 就认为此时得到的平衡解是稳定的. 为此, 令  $y_n$  为第  $n$  辆车与  $n+1$  辆车的车距的微扰, 即

$$s_n = s^{(0)} + y_n, \quad |y_n| \ll s^{(0)}. \quad (8)$$

忽略  $y_n$  的高阶项, 得到

$$\ddot{y}_n = \ddot{s}_n = a_{n+1} - a_n = f_1 \Delta y_n + \left(f_2 - \frac{a_0}{v_0}\right) \dot{y}_n, \quad (9)$$

其中  $\Delta y_n = y_{n+1} - y_n$ , 并且

$$f_1 = \frac{\partial f}{\partial s} \Big|_{s=s^{(0)}, v=v^{(0)}}, \quad f_2 = \frac{\partial f}{\partial v} \Big|_{s=s^{(0)}, v=v^{(0)}}, \quad (10)$$

而  $f$  即为(3)式表示的相互作用函数.

将(9)式的解按 Fourier 展开, 得到

$$y_n(t) = \sum_k \omega_{nk} y_{nk}(t) = \sum_k \omega_{nk} e^{(i\alpha_k n + \omega_k t)}, \quad (11)$$

其中  $n=0, 1, 2, \dots, N, \alpha_k = \frac{2\pi}{N}k$  ( $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ ),  $\omega_{nk}$  为展开系数. 当  $k=0$  时, 对应的解为  $y_1 = y_2 = \dots = y_n, \dot{y}_1 = \dot{y}_2 = \dots = \dot{y}_n$ , 即所有车距和车速均为常数, 显然为稳定解的情况. 当  $k \neq 0$  时, 利用均匀分布的初始条件, 得到展开系数  $\omega_{nk}$  对所有的  $n$  都是相同的. 将(11)式代入(9)式, 利用上面的结论, 就得到  $z$  的方程:

$$z^2 + \left(\frac{a_0}{v_0} - f\right)z + f_1(1 - e^{i\alpha_k}) = 0. \quad (12)$$

如果平衡解是稳定的, 则(11)式中的每一个模式的振幅最终都将趋于零. 这就要求  $z$  的实部必须小于零. 从上面的方程知道这等价于

$$f_1 < \frac{1}{2} \left(\frac{a_0}{v_0} - f_2\right)^2. \quad (13)$$

图2给出了(13)式左右两边随车辆平衡密度的变化. 这里的各项参数均与图1的相同. 从图2可以

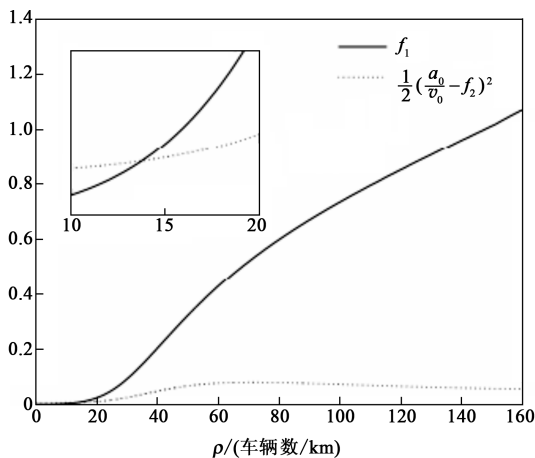


图2 线性稳定性分析的结果(图中左上方的小框中表示两条曲线交叉点处放大的情况)

看到,当车辆密度  $\rho > 14$  辆/km 时,得到的平衡解是不稳定的.反之,车辆密度很小或车辆密度很大时均不会受到微扰的影响,这样的情况分别称之为畅通态和(完全)堵塞态,而处在其间的状态称之为拥塞态.

### 4 数值模拟结果

现在用数值模拟的方法来继续上一节的讨论.在下面的讨论中,取  $N=200$ .

由上一节的结论得到,只有当车辆密度  $\rho < 14$  辆/km 时才有稳定的平衡解.这里给出一个具有代表性的例子.令所有车辆之间的初始距离为  $s^{(0)} = 90\text{m}$ ,除了第 200 辆车以外,其他车的初始速度为  $v_{ini} = 80\text{km/h}$ ,而  $v_{200} = 1.1v_{ini}$ . 车辆依车流行驶方向递增编号.

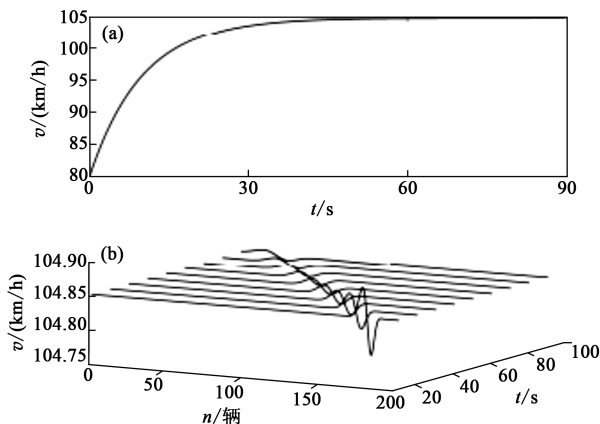


图3 (a)畅通态中在微扰情况下车流的平均速度随时间的变化曲线;(b)车流中每一辆车的速度随时间的变化

在图3中,给出了车流的平均速度以及每一辆车的速度随时间的变化.从中可以看到平均速度很

快地达到了初始密度对应的平衡速度  $v^{(0)} = 104.85\text{km/h}$ . 给定的微扰则逆着速度的方向演变成了一个完整周期的类正弦波包.虽然随时间的推移其波包宽度在扩展,但是其幅度随时间逐步趋近于零,与采用线性化分析得到的结果一致.另外,  $v_{ini}$  的选取不影响最后达到的平衡速度以及解的稳定性,只是不同情况下的弛豫时间略有不同.

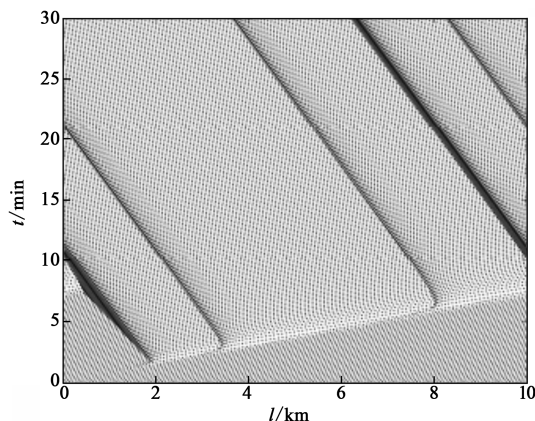


图4 拥塞态车流的时空  $l-t$  演化关系(其中  $l$  为车流的空间距离,  $t$  为车流的运行时间,颜色深浅代表车辆密度大小)

图4给出了一个不存在稳定平衡解的典型情况.令  $s=50\text{m}$ ,  $v_{ini}=70\text{km/h}$ . 微扰的引入与第一个例子相同.如同线性化理论所预言的一样,此时并不存在一个稳定的平衡解.微扰的幅度逐渐扩大,最后形成了交通拥塞,这样的情况称为拥塞态.从图4可以看到,形成的3个堵塞区逆着车流速度的方向传播,其速度保持在  $11.7\text{km/h}$ ,在 Helbing 观察到的实际数据  $15 \pm 5\text{km/h}$  之内<sup>[24]</sup>. 其中一个拥塞区较大,由 25 辆左右速度小于  $3\text{km/h}$  的车组成.另外也发现,如果改变微扰的幅度,甚至把  $v_{200}$  增大到  $2v_{ini}$ ,最宽的拥塞区的宽度、它的传播速度以及其中车辆的运行速度几乎没有任何改变,只与最初的密度有关.从图5中可以看到,在拥塞区之外存在一个速度约为  $100\text{km/h}$  的平台,其对应的平衡间距为  $s^{(0)} = 65.3\text{m}$ ,可以把这一区域看成局部的平衡状态.

### 5 宏观模型

下面给出相应的宏观模型,并将得到的结果与微观模型进行比较.

通常在宏观模型中,车流被当作准一维的流体.它描述车流的整体特性,车流速度  $V$  和密度  $\rho$  是时间和空间的连续函数.按照 Helbing 等人的建议<sup>[25]</sup>,将  $V$  用微观模型中每辆车的速度  $v_n$  的线性插值表示,即



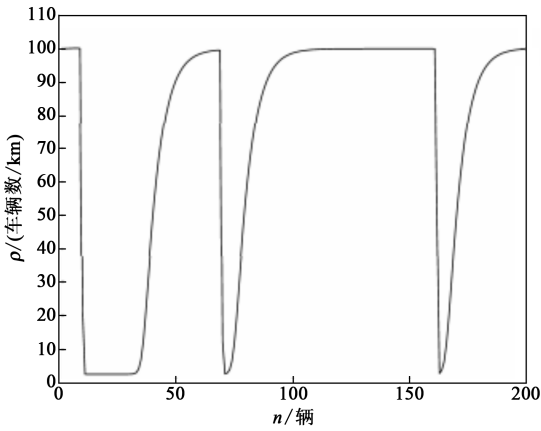


图5 微观模型中拥塞态时间为  $t=16\text{min}$  时车辆的速度分布

$$V(x, t) = \frac{1}{s_n(t)} \{v_{n+1}(t)[x - x_n(t)] + v_n(t)[x_{n+1}(t) - x]\} \quad (14)$$

类似地,可以定义

$$S(x, t) = \frac{1}{s_n(t)} \{s_{n+1}(t)[x - x_n(t)] + s_n(t)[x_{n+1}(t) - x]\} \quad (15)$$

从而得到  $\rho(x, t) = 1/S(x, t)$  的表达式.

对  $V(x, t)$  作全微分,得到

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = A(x, t) \quad (16)$$

这里的  $A(x, t)$  正是微观模型中前后两车加速度的线性插值,即

$$A(x, t) = \frac{1}{s_n(t)} \{a_{n+1}(t)[x - x_n(t)] + a_n(t)[x_{n+1}(t) - x]\} \quad (17)$$

为了将上式右端的间断量转变为连续量,特作如下近似:

$$A(x, t) \approx a(\rho(x, t), V(x, t)) \quad (18)$$

其中  $a$  就是(4)式表示的函数关系.

由车辆数目不变性(暂不考虑高速公路的入口和出口),很自然地得到下面的守恒关系:

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

其中  $Q(x, t) = \rho(x, t)V(x, t)$  是车流量. 这样,就可以得到  $\rho(x, t)$  和  $V(x, t)$  满足的关系. 为了引入与微观模型相同的微扰,在解方程组时采用特征线的方法,格点的个数就取为车辆的数目  $N=200$ , 并且初始时隔点均匀分布. 下面就在相同的初始条件和边界条件下来比较它与微观模型得到的结果的异同.

首先来看稳定的情况,发现其结果与图3中几乎完全一致. 微扰同样沿着上游的方向演变成了一个完整周期的有扩散的类正弦波包. 表1列出了两

种模型中微扰幅度随时间的变化. 从中可以看到,其差别在现实意义上是完全可以忽略的.

表1 微观模型和宏观模型中畅通态下的微扰幅度随时间的变化

$t / \text{min}$	微观模型 / (km/h)	宏观模型 / (km/h)
10	0.0502	0.0489
20	0.0247	0.0251
30	0.0162	0.0169
40	0.0122	0.0127
50	0.0097	0.0101
60	0.0081	0.0084

其次,再来看看不稳定的情况. 此时宏观模型得到的结果仍然和微观模型的结果非常相似. 这里为了看清密度的具体数值,将车流的时空演化用三维图(见图6)来表示,可以看到它与图4几乎完全一致. 图7给出了宏观模型下时间为  $t=16\text{min}$  时车辆的速度分布图. 其中,除了略小的堵塞区长度和略高的局域平衡速度外,其他特征均与图5相同.

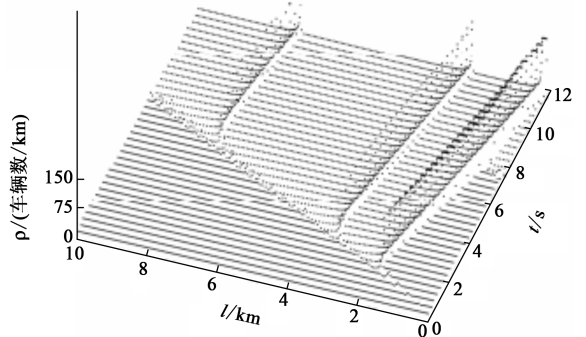


图6 宏观模型中拥塞态车流密度的时空演化图

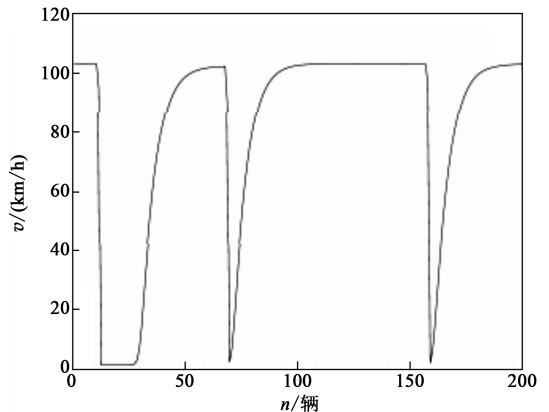


图7 宏观模型中拥塞态时间为  $t=16\text{min}$  时车辆的速度分布图

## 6 结束语

本文以交通动力学的两车模型为基础,结合相应

的宏观模型,综合考虑交通流中车辆依据交通情况来调整车辆的运行,以保持安全前提下的速度和间距,建立了适用于高速公路的单轨道无超车相互作用力模型.在该模型中,考虑了交通流中前车对后车的排斥力的影响以及后车的加速度中的几个因素.

该模型与平衡态的经验数据相符.在单轨交通条件下,通过线性化方法研究了该动力学模型的平衡解及其在车流具有微扰情况下的条件稳定的性质.由数值模拟的方法给出了几个典型的例子,说明该模型对一些已知的交通相,特别是自由态、拥塞态及堵塞态给出了恰当的数值模拟.通过与真实现象中的一些特征比较,说明这个相互作用力模型的可行性.作者期望以此为基础,为复杂交通道路环境控制的进一步研究提供一些新的线索.

尽管本文给出了一个探讨交通流的具体实例,但是交通流的研究范围和方式还有很多.最重要的实际应用应该来自于模型研究和实证数据的对比.参照道路交通环境进行动态分析,提供道路交通状况的大致的研究和判断结果,通过广播、联网等手段实时为机动车驾驶者提供多种可选择的路径等信息,将是未来的一个重要的应用方向.同时,物理工作者在模拟道路网络及其交通设置(如交通信号灯、岔道、公共汽车站等)对于整体交通流的影响方面,也能给出最优化方案,为城市规划提供有益的建议.

### 参考文献

[1] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A. *Phys. Rep.*, 2000, 329 (4—6): 199

- [2] Helbing D. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, 73 (4): 1067  
 [3] Nagatani T. *Rep. Prog. Phys.*, 2002, 65 (9): 1331  
 [4] Kerner B S. *The Physics of Traffic*. Berlin: Springer, 2004  
 [5] Mahnke R, Kaupuzs J, Lubashevsky I. *Phys. Rep.*, 2005, 408 (1—2): 1  
 [6] Greenshields B D. A study in highway capacity. In: *Proceedings of Highway Research Board*, Vol 14. Washington D. C.: Highway Research Board, 1934, 448  
 [7] Kerner B S. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81 (17): 3797  
 [8] Tomer E, Safonov L, Havlin S. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84 (2): 382  
 [9] Kerner B S, Konhkauser P. *Phys. Rev. E*, 1993, 48 (4): 82335  
 [10] Kerner B S, Konhkauser P. *Phys. Rev. E*, 1994, 50 (1): 54  
 [11] Kerner B S. *Phys. Rev. E*, 2002, 65 (4): 046138-1  
 [12] Treiber M, Henneke A, Helbing D. *Phys. Rev. E*, 2000, 62 (2): 1805  
 [13] Helbing D, Johansson A F. *Eur. Phys. J. B*, 2009, 69: 549; Zhang H M. *ibid*, 2009, 69: 563; Helbing D. *ibid*, 2009, 69: 569  
 [14] Helbing D. *Coop. Transp. Dyn.*, 2002, 1(2): 1  
 [15] Bando M, Hasebe K, Nakayama A *et al.* *Phys. Rev. E*, 1995, 51 (2): 1035  
 [16] Helbing D, Tilch B. *Phys. Rev. E*, 1998, 58 (1): 133  
 [17] Zhang J W, Xu C, Zou Y *et al.* *Front. Phys. China*, 2006, 3 (4): 375  
 [18] Wang D H, Wei Z Q, Fan Y. *Phys. Rev. E*, 2007, 76 (1): 016105-1  
 [19] Gao K, Jiang R, Hu S X *et al.* *Phys. Rev. E*, 2007, 76 (2): 026105-1  
 [20] Nagatani T. *Phys. Rev. E*, 1998, 58 (4): 4271  
 [21] Nagatani T. *Phys. Rev. E*, 2000, 61 (4): 3534  
 [22] Lubashevsky I, Kalenkov S, Mahnke R. *Phys. Rev. E*, 2002, 65 (3): 036140-1  
 [23] Zhang J W, Zou Y, Ge L. *Physica A*, 2007, 376: 628  
 [24] Helbing D. *Phys. Rev. E*, 1996, 53 (3): 2366  
 [25] Helbing D, Henneke A, Treiber M. *Math. Comput. Model.*, 2002, 35 (5—6): 517  
 [26] Davis L C. *Phys. Rev. E*, 2004, 69 (1): 016108-1

• 读者和编者 •

## 2010 年征订启事

《物理》是中国物理学会、中国科学院物理研究所主办出版的学术期刊,1972 年创刊,致力于传播当代物理学及其交叉学科的前沿最新进展,促进物理学与相关学科的相互交叉和渗透,沟通科研与产业,推动中国物理学的发展.作为中国物理学会的会员刊物,《物理》拥有众多来自科研和教学一线的优秀作者,集科学性、前沿性和可读性为一体,特色鲜明,让读者轻松掌握当前物理学各领域的最新动态,读者遍及国内各相关院所、高等学校和企业界.

《物理》每月 12 日出版发行,邮局定价为 240 元/年.2010 年度的期刊订阅正在进行,为感谢广大读者长期以来对《物理》杂志的关爱和支持,《物理》编辑部特推出以下优惠订阅活动:

1、凡是中国物理学会交纳会费的会员,可享受优惠订阅价 120 元/年,或者 400 元/四年(订阅杂志的费用可以连同会费一起交到中国物理学会,也可以直接向编辑部订阅并提供相关证明);

2、其他非会员订户,凡向编辑部订阅《物理》杂志的,可享受优惠订阅价 180 元/年.

汇款方式:(1) 邮局汇款:100190,北京 603 信箱,《物理》编辑部收;

(2) 银行汇款:户名:中国科学院物理研究所

帐号:30948821—250101040005699

开户行:农行北京科院南路支行

银行汇款时请注明“《物理》杂志”

欲了解更多详情可以登录 [www.wuli.ac.cn](http://www.wuli.ac.cn) 查询,也可来电来信咨询.

咨询电话:010—82649266,82649470(王进萍); Email: [physics@iphy.ac.cn](mailto:physics@iphy.ac.cn)