

# 改进的基于安全距离的车辆跟驰模型

杨 达<sup>1,2</sup>, 蒲 云<sup>1</sup>, 祝俐菱<sup>1</sup>, 杨 飞<sup>1</sup>, Ran Bin<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031;

2. 美国威斯康星大学麦迪逊分校 土木与环境工程学院, 麦迪逊 53716)

**摘 要:** 由于经典的基于安全距离的车辆跟驰模型 Gipps 模型要求车辆行驶时恰好与前车保持安全距离, 这是一个对车辆跟驰行为过分严格的约束, 不符合实际情况, 根据实际情况提出车辆跟驰距离是有关安全距离和前后车相对速度的函数, 并据此建立了改进的基于安全距离的车辆跟驰模型. NGSIM 数据经过处理后被用来标定 Gipps 模型和改进后的模型, 在标定结果的基础上对模型进行了统计意义上和仿真预测能力上的模型评价. 结果显示: 改进后的基于安全距离的车辆跟驰模型比 Gipps 模型有更高的仿真精确, 可以再现出宏观交通中的稳定交通流和冲击波等常见的交通现象, 并且改进模型在一定程度上使交通流变得更加稳定.

**关键词:** 交通运输工程; 车辆跟驰; 数学模型; 安全距离

**中图分类号:** U 491.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2013)09-1335-08

## Improved Safe Distance Car-following Model

YANG Da<sup>1,2</sup>, PU Yun<sup>1</sup>, ZHU Li-ling<sup>1</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>, BIN Ran<sup>2</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison 53716, USA)

**Abstract:** Gipps' model, the well-known safe distance car-following model, has a strict restriction on the car-following behavior, that is, the following vehicle has to maintain the exact safe distance with the leading vehicle to avoid accident. However, this restriction is not consistent with the reality. Owing to this reason, an enhanced safe distance car-following model was proposed first, and then evaluated by comparing with Gipps' model. Furthermore, simulations were conducted to analyze the characteristics of the new model. The results of evaluation and simulation illustrate that the proposed model has more accurate prediction result than Gipps' model, and can reproduce the stable flow and shockwave that are very common in real traffic flow. In addition, the enhanced model can stabilize traffic flow.

**Key words:** traffic and transportation engineering; car-following; mathematical model; safe distance

车辆跟驰理论是微观交通流理论中十分重要的一部分,是交通仿真中所使用的最基本的仿真模型之一,也是理解宏观交通流形成发展过程不可或缺的理论基石. 研究车辆跟驰理论也有很重要的实践意义,可以帮助交通的组织管理和缓减交通拥堵. 对于车辆跟驰理论的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代末,在这几十年的发展过程中,学者们建立了五大

类车辆跟驰模型: GHR 模型、安全距离模型、线性模型、心理模型以及基于模糊理论模型<sup>[1]</sup>. 其中安全距离模型的代表模型是由 Gipps 在 1981 年提出的<sup>[2]</sup>, Gipps 假设如果前车紧急刹车,后车会选择一个速度使得 2 辆车不会发生追尾事故. 自从 Gipps 提出这个模型以后,该模型就受到了交通界极大的关注<sup>[3-5]</sup>,成为微观交通流领域中一个十分经典的

收稿日期: 2012-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278429).

作者简介: 杨 达(1985—),男,博士研究生,主要从事交通流和智能交通方面的研究, E-mail: yangd8@gmail.com.

模型. 因为该模型有较好的还原车辆跟驰行为的优点, 它已经被著名的交通仿真软件 AIMSUN 采用作为车辆跟驰行为的仿真机理; Gipps 模型还有一个重要的优点是模型中的参数都对应于车辆跟驰中人或车辆的特点, 极大地简化了在模型参数标定时参数范围选择的难度, 提高了标定的精度<sup>[2]</sup>; 此外, Gipps 模型将反应时间包含在了模型本身中, 这就避免了在仿真中反应时间和仿真不一致所带来的各种困难, 简化了仿真过程<sup>[2]</sup>.

然而, Gipps 模型的一个重要的缺陷是, 它给了模型一个十分严格的安全距离约束, 那就是所有车辆在行驶过程中都必须恰好行驶在由当前车辆行驶状态决定的安全距离上, 很显然, 这个严格的约束是不符合实际的. 在实际中, 很多人对真实的安全距离估计有比较大的误差, 或者是小于安全距离或者

是大于安全距离, 很少有人能完全按照安全距离行驶. 所以, Gipps 安全距离模型还有待改进. 本文试图弥补 Gipps 模型的上述缺点, 通过将新的跟驰规则考虑到 Gipps 的车辆跟驰模型中, 建立新的基于安全距离的车辆跟驰模型.

## 1 模型建立

### 1.1 变量描述

首先设置车辆跟驰的基本场景, 如图 1 所示, 有  $N$  个车行驶在单车道上, 行驶的方向为横坐标的正方向, 从前到后车辆的编号分别为  $1, \dots, n-1, n, n+1 \dots N$ , 车辆  $n$  的位置为  $x_n$ , 车长为  $S_n$ , 行驶的速度为  $v_n$ . 车辆  $n$  跟随着车辆  $n-1$  行驶, 车辆  $n+1$  跟随着车辆  $n$  行驶.

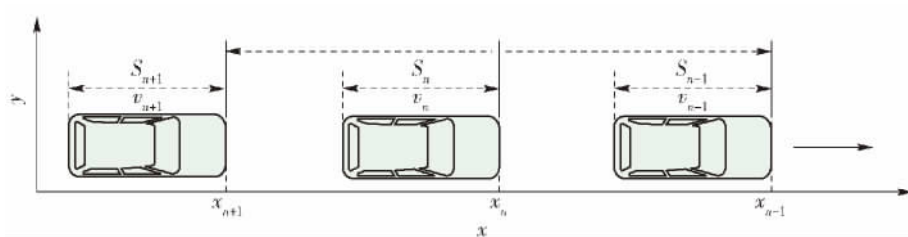


图 1 车辆跟驰行为的基本模式

Fig. 1 Basic scenario of car-following behavior

### 1.2 Gipps 车辆跟驰模型

首先给出 Gipps 的车辆跟驰模型如式(1)所示. 式中  $a_n$ 、 $V_n$ 、 $b_n$ 、 $b_{n-1}$  为需要进行标定的参数, 其代表的含义分别为车辆  $n$  所采取的最大加速度、车辆

$n$  在当前交通环境中所能采用的速度上限、车辆  $n$  所采用的最大减速度和车辆  $n-1$  所采用的最大减速度.

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{aligned} &v_n(t) + 2.5a_n\tau \left( 1 - \frac{v_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n}} \\ &-b_n \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) + \sqrt{b_n^2 \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right)^2 + b_n \left\{ 2 [x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1}] - \tau v_n(t) + \frac{v_{n-1}^2(t)}{b_{n-1}} \right\}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Gipps 车辆跟驰模型对自由行驶状态和拥挤状态的车辆行驶速度都进行了分析, 对自由行驶状态, Gipps 给出的是一个经验公式, 如式(1)中第 1 个方程式所示; 对拥挤状态是根据紧急刹车时的最小安全距离计算的, 如式(1)中第 2 个方程式所示. 图 2 即为 Gipps 计算最小安全距离的原理. 图中假设  $t = t_b$  时, 车辆  $n-1$  执行紧急刹车, 设在  $t = t_{n-1}^{\text{stop}}$  时车辆  $n-1$  停下来, 在  $t = t_n^{\text{stop}}$  时, 车辆  $n$  停下来. 则从车辆  $n-1$  紧急刹车起到它完全停止, 行驶过的距离是  $v_{n-1}(t)^2 / 2b_{n-1}$ . 车辆  $n-1$  经过反应时间  $\tau$  和为了

保证安全附加的反应时间  $\theta$  后才开始紧急刹车, 到其完全停止, 行驶过的距离是  $x_n(t_{n-1}^{\text{stop}}) - x_n(t_b)$ . 当 2 辆车都完全停下来时, 它们之间要保持一个驾驶员一般都不愿意侵入的小的间距  $d$ . 此处需要说明, 在本文中车长  $S_{n-1}$  和  $S_n$  都看做有效车长, 也就是实际车长加驾驶员不愿意侵入的间距  $d$  的总长度. 所以, 如果想让 2 车不相撞, 必须满足

$$x_{n-1}(t_{n-1}^{\text{stop}}) - S_{n-1} \geq x_n(t_n^{\text{stop}}) \quad (2)$$

其中

$$x_{n-1}(t_{n-1}^{\text{stop}}) = x_{n-1}(t_b) + v_{n-1}(t)^2 / 2b_{n-1} \quad (3)$$

$$x_n(t_n^{\text{stop}}) = x_{n-1}(t_b) + \tau \frac{v_n(t) + v_n(t+\tau)}{2} + v_n(t+\tau)\theta + \frac{v_n(t+\tau)^2}{2b_n} \quad (4)$$

$$x_{n-1}(t) + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} - S_{n-1} \geq x_n(t) + \tau \frac{v_n(t) + v_n(t+\tau)}{2} + v_n(t+\tau)\theta + \frac{v_n(t+\tau)^2}{2b_n} \quad (5)$$

从而可以得到

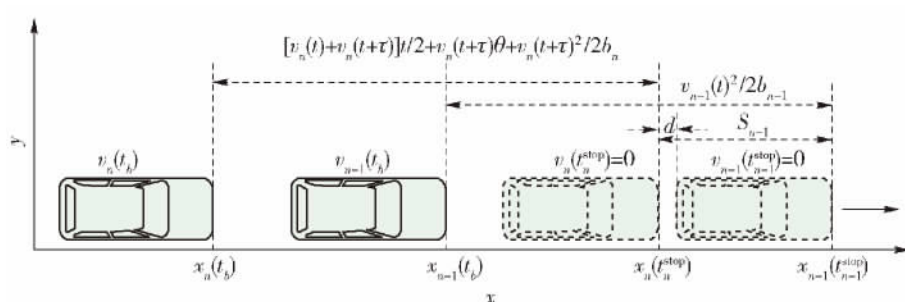


图2 Gipps 模型原理图

Fig.2 Theory plot of Gipps' model

### 1.3 改进的安全距离模型

从1.2中的Gipps模型的建立过程可以看出,在对拥挤状态进行处理的时候,该模型只取了车辆跟驰距离等于最小安全距离的情况,这个处理方式对于模型中的车辆速度是一个很强的约束.因为很少有驾驶员可以完全地遵守这个约束.这可能有很多方面的原因,比如驾驶员对安全距离的估计产生的误差、对自身车速和前车车速估计产生的误差、对2车之间距离估计产生的误差等等.虽然驾驶员不可能完全行驶在安全距离上,但是驾驶员都试图将跟随间距保持在安全距离附近,也就是说跟随距离应该不是完全等于安全距离,但却是安全距离的一个函数.此外,在车辆行驶中,还遵循着这样一个规则:当前车行驶速度大于后车时,后车更倾向于保持略小于安全距离的跟随间距;当前车行驶速度小于后车时,后车则倾向于略大于安全距离的跟随间距.事实上,通过分析Gipps的车辆跟驰模型,也可以发现,该模型中没有有关2车相对速度的项.综上所述,跟随间距应该是一个有关安全距离和前后车相对车速的函数.

首先对式(2)进行变形得到2个车在任意时刻的间距为

$$x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1} = \frac{v_n(t)\tau}{2} + \frac{v_n(t+\tau)\tau}{2} +$$

$$v_n(t+\tau) \geq -b_n \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) + \sqrt{b_n^2 \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right)^2 + b_n \left\{ 2 [x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1}] - \tau v_n(t) + \frac{v_{n-1}(t)^2}{b_{n-1}} \right\}} \quad (6)$$

式(6)即对应于Gipps模型式(1)中的第2个式子,Gipps模型认为在拥挤状态下, $v_n(t+\tau)$ 恰好使车辆n保持最小的安全距离.也就是只取了式(6)左右两边相等的情况.Gipps模型原理见图2.

$$v_n(t+\tau)\theta + \frac{v_n(t+\tau)^2}{2b_n} - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} \quad (7)$$

由Gipps模型的建立原理可知,其中待求变量 $v_n(t+\tau)$ 的作用即为保持 $x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1}$ 为安全距离,所以安全距离 $D_s$ 的表达式为

$$D_s = \frac{v_n(t)\tau}{2} + \frac{v_n(t+\tau)\tau}{2} + v_n(t+\tau)\theta + \frac{v_n(t+\tau)^2}{2b_n} - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} \quad (8)$$

根据前边分析,车辆跟驰距离应为安全距离和前后2车速度差的方程,文献[6]和[7]也证明了车辆跟驰距离与前后车的速度差是相关的.所以可以得到跟驰距离 $D_{cf}$ 的表达式为

$$D_{cf} = F(D_s, \Delta v_n(t)) \quad (9)$$

设 $D_{cf}$ 与 $\Delta v_n(t)$ 的关系是线性的,则

$$D_{cf} = D_s \cdot [H(\Delta v_n(t))(\alpha_1 \Delta v_n(t) + \beta_1) + H(-\Delta v_n(t))(\alpha_2 \Delta v_n(t) + \beta_2)] \quad (10)$$

式中: $H(\cdot)$ 为Heaviside函数,当括号里边的值大于零时, $H(\cdot) = 1$ ,当括号里边的值小于零时, $H(\cdot) = 0$ ,当括号里边的值等于零时, $H(\cdot) = 0.5$ ;  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ 分别为需要进行标定的参数.

将式(10)代入式(7),并推导出 $v_n(t+\tau)$ 的表达式如式(11)所示.再考虑在自由车辆的情况,就可以得到新的改进的基于安全距离的车辆跟驰模型,如式(12)所示.

$$v_n(t+\tau) = -b_n \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) + \sqrt{b_n^2 \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right)^2 + b_n \left( \frac{2(x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1})}{H(\Delta v_n(t)) \cdot (\alpha_1 \Delta v_n(t) + \beta_1) + H(-\Delta v_n(t)) \cdot (\alpha_2 \Delta v_n(t) + \beta_2)} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{b_{n-1}} - v_n(t) \tau \right)} \quad (11)$$

$$v_n(t+\tau) = \min \begin{cases} v_n(t) + 2.5a_n\tau \left( 1 - \frac{v_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n}} \\ -b_n \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) + \sqrt{b_n^2 \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right)^2 + b_n \left( \frac{2(x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1})}{H(\Delta v_n(t)) \cdot (\alpha_1 \Delta v_n(t) + \beta_1) + H(-\Delta v_n(t)) \cdot (\alpha_2 \Delta v_n(t) + \beta_2)} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{b_{n-1}} - v_n(t) \tau \right)} \end{cases} \quad (12)$$

## 2 模型参数标定

### 2.1 数据描述

进行模型参数的标定需要有实际的车辆跟驰数据支撑,数据质量的好坏对模型标定的结果有着十分重要的影响,既要求数据有很好的精度又要求有比较好的延续性和足够长的时间. 车辆轨迹数据 (trajectory data) 是理想的研究车辆跟驰的数据,本文使用美国联邦高速公路管理局为下一代交通仿真专门通过视频采集的道路车辆行驶轨迹数据: Next Generation Simulation (NGSIM) 项目的数据. NGSIM 数据包含多个时段和多个路段的数据,本文采用的 NGSIM 数据采集于美国加州洛杉矶 101 号高速公路,整个路段长约 700 m,共包含了 5 个主车道和 1 个附加车道,数据采集的时间是在早高峰的 7:50—8:35,持续了 45 min. 采集方式是高清视频录像,每 0.1 s 记录 1 次当时的速度和位置等道路信息. 该数据包括了多个车道上每辆车的行驶位置、速度、加速度等信息. 但是,由于该数据是多车道行驶数据,所以在应用到本研究之前需要进行处理使之满足车辆跟驰研究的需要,以下是用来处理数据的几个基本规则:

- 1) 数据以 1 对进行车辆跟驰的车为单位进行选取;
- 2) 每对所选车辆都位于同一车道上,没有换道;
- 3) 每个所选车都有前车,也就是说车队的第 1 辆车不作为目标车辆;
- 4) 车辆的轨迹在一段时间内有比较明显的车辆跟驰的特性;

5) 如果 2 辆车之间间距太大,则视为非车辆跟驰状态;

6) 每对跟驰的车辆行驶时间至少为 30 s.

### 2.2 参数标定方法

对于车辆跟驰模型的参数标定,可以将其抽象为一个求解非线性规划最优解的问题,其中目标函数是实际数据和模型仿真数据的差值最小,自变量是车辆跟驰模型的各个参数,约束条件是各参数的物理范围,可以表示为通式

$$\begin{aligned} \min F_{\text{objective}} &= f(v, x, a, p) \\ h_i(p) &= 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n_h) \\ g_j(p) &\geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n_g) \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $F_{\text{objective}}$  是目标函数,为车辆行驶状态(速度、位置、加速度等)的函数;  $v, x, a$  分别是车辆的速度、位置和加速度;  $h_i(p)$  是线性约束;  $g_j(p)$  是非线性约束;  $n_h$  和  $n_g$  是线性和非线性约束的数量.

对于目标函数的选择有很多种,本文中使用的已经被很多文献证明有效的 Theil's  $U$  函数<sup>[8-9]</sup>,在本文的 Theil's  $U$  函数中加速度被用来作为自变量,其式表示为

$$F_{\text{objective}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (a_m^{\text{real}} - a_m^{\text{sim}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (a_m^{\text{real}})^2} + \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (a_m^{\text{sim}})^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M (a_m^{\text{real}} - a_m^{\text{sim}})^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M (a_m^{\text{real}})^2} + \sqrt{\sum_{m=1}^M (a_m^{\text{sim}})^2}} \quad (14)$$

式中:  $F_{\text{objective}}$  即为目标函数;  $a_m^{\text{real}}$  是来自于数据中的真实加速度;  $a_m^{\text{sim}}$  是模型产生的仿真加速度;  $m = 1$ ,

...,  $M$  是数据样本的编号. 使用加速度作为变量的原因是本文中所使用的 NGSIM 数据包含有大量的恒定车间距和速度的情况, 如果使用速度或者是车间距作为目标函数变量, 最优化算法可能最终会收敛到使得车辆之间的相互作用最小的参数上(如文献[10]所述). 这种效果不是车辆跟驰行为假设所能接受的, 所以本文以加速度作为目标函数变量.

本文所建立的改进的基于安全距离的车辆跟驰模型需要进行标定的参数包括 2 部分, 第 1 部分来

自原 Gipps 模型, 第 2 部分来自新增加的与相对速度有关的 4 个参数. 来自 Gipps 模型的参数的取值范围是结合文献[4]和参数的物理意义以及文中所使用的实际数据的特征来确定的. 文献[4]中的数据和本文采用的实际数据的基本交通环境是一致的, 所以这几个参数取值的范围也变化不大. 新参数的确定是通过多次的数据测试来给定的一个粗略的范围, 然后再进行标定. 本文所涉及参数的取值范围见表 1.

表 1 模型参数的取值范围

Table 1 Range of the model parameters

| 参数   | Gipps 和改进模型共有参数                        |                                        |                                        |                                            | 改进模型的其他参数  |           |            |           |
|------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
|      | $a_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | $v_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $b_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | $b_{n-1} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | $\alpha_1$ | $\beta_1$ | $\alpha_2$ | $\beta_2$ |
| 取值范围 | 3.0 ~ 11.2                             | 45 ~ 70                                | -11.2 ~ -3.0                           | -13 ~ -3                                   | -10 ~ 0    | -10 ~ 10  | 0 ~ 10     | -10 ~ 10  |

### 2.3 参数标定结果

在确定了目标函数和参数的可行范围后, 就可以将所选出来的 NGSIM 数据带入到 Gipps 模型和改进的模型中进行参数标定. 本文解非线性规划所采用的算法是遗传算法. 利用 Matlab 自带的软件包

中的 CA 函数已经足够处理本论文所遇到的问题, 能得到比较精确的参数值. 经过多次重复运行程序后, 得到了模型中各参数在该数据信息下的最终取值结果, 见表 2.

表 2 参数标定结果

Table 2 Calibration results of the parameters

| 参数                                         | Gipps 模型 | 改进模型   | 参数                     | Gipps 模型 | 改进模型  |
|--------------------------------------------|----------|--------|------------------------|----------|-------|
| $a_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$     | 3.78     | 4.81   | $\beta_1$              | —        | 2.36  |
| $v_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$     | 58.19    | 51.28  | $\alpha_2$             | —        | 0.067 |
| $b_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$     | -3.34    | -3.81  | $\beta_2$              | —        | 1.98  |
| $b_{n-1} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | -3.00    | -3.00  | $F_{\text{objective}}$ | 0.525    | 0.435 |
| $\alpha_1$                                 | —        | -0.009 |                        |          |       |

进行参数标定, 除了得到各参数的取值外, 还得到了目标函数的值, 也已经列入表 2 中.  $F_{\text{objective}}$  值可以从一定程度上看出模型的效果. 比较 Gipps 模型和改进模型的  $F_{\text{objective}}$  值, 可以发现新模型的  $F_{\text{objective}}$  值略小于 Gipps 模型, 看起来似乎新模型对车辆跟驰的预测效果要好于 Gipps 模型, 这个结论还需要进一步验证.

## 3 模型评价

### 3.1 评价指标

模型参数标定完成以后, 就可以在统计学意义上对模型进行评价了, 本文中所采用的评价的指标有: 平均误差 (ME)、平均绝对误差 (MAE)、平均绝对相对误差 (MARE) 和均方根误差 (RMSE) 等几个

统计学变量<sup>[8,11-12]</sup>. 它们的表达形式为

$$\text{ME} = \frac{\sum_{m=1}^M (x_m^{\text{real}} - x_m^{\text{sim}})}{M} \quad (15)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{m=1}^M |x_m^{\text{real}} - x_m^{\text{sim}}|}{M} \quad (16)$$

$$\text{MARE} = \frac{\sum_{m=1}^M (|x_m^{\text{real}} - x_m^{\text{sim}}| / x_m^{\text{real}})}{M} \quad (17)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M |x_m^{\text{real}} - x_m^{\text{sim}}|^2}{M}} \quad (18)$$

式中:  $m$  是样本编号;  $M$  是总的样本数量;  $x_m^{\text{real}}$  是第  $m$  个实际数据, 该变量可以选择加速度、速度和位

置;  $x_m^{\text{sim}}$  是第  $m$  个仿真数据, 所选择的变量应和  $x_m^{\text{real}}$  所取的变量一致.

### 3.2 评价结果

本文对车辆的加速度、速度和位置都进行了评价. 首先将前边所选出来的实际的 NGSIM 数据中前车的速度、位置信息输入到经过标定的 Gipps 模

型和改进后的模型中, 然后调用编好的有关 2 个模型的 Matlab 程序来计算模型的输出值, 也就是仿真值, 将仿真值和真实的数据进行比较, 计算它们在统计学上各评价指标的值, 得到表 3 中的结果. 该表分别列出了 Gipps 模型和改进模型的加速度、速度和位置的评价结果.

表 3 模型评价结果  
Table 3 Evaluation results

| 模型       | 加速度   |      |      |      | 速度    |      |       |      | 位置    |      |       |      |
|----------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|          | ME    | MAE  | MARE | RMSE | ME    | MAE  | MARE  | RMSE | ME    | MAE  | MARE  | RMSE |
| Gipps 模型 | -0.25 | 2.51 | 0.27 | 3.24 | -0.27 | 2.05 | 0.071 | 2.62 | -0.15 | 1.78 | 0.003 | 2.33 |
| 改进模型     | 0.07  | 2.30 | 0.16 | 3.20 | 0.08  | 1.98 | 0.058 | 2.56 | 0.05  | 1.70 | 0.002 | 2.06 |

从表 3 来看, 无论是加速度、速度还是位置, 改进模型的大部分指标要小于 Gipps 模型. ME 指标说明 Gipps 模型趋向于产生略大于真实值的车辆速度、位置和加速度, 而改进模型则趋向于产生略小于真实值的车辆、位置和加速度. 但是总体上来说, 在一定程度上改进的基于安全距离的车辆跟驰模型要比 Gipps 模型有更加准确的仿真效果. 以上分析已经证明了新模型在交通仿真中的精确性, 接下来, 从模型本身的性质出发来探求它在车辆跟驰行为中所表现中的一些特性.

## 4 模型仿真分析

### 4.1 仿真场景设置

为了进一步研究改进模型的特点, 建立了 3 个仿真实验来对模型进行分析, 其主要目的是: 探究新模型在宏观上对交通流的再现能力; 与 Gipps 模型在宏观上进行对比.

仿真初始场景设置如下: 在一个环形的车道上均匀放置 100 辆完全相同的车, 所有车处于平衡状态, 也就是相邻车辆之间的车头间距  $h_u$  相同, 所有车辆行驶的速度  $v_u$  相同. 其中第 100 辆车跟随第 1 辆车行驶, 所有车辆都满足车辆跟驰行为的基本限制. 这是一种典型的车辆跟驰仿真场景设置方式, 已经被很多研究证明了它的有效性<sup>[13-14]</sup>. 在仿真中扰动是在第 2 个仿真周期加入的, 加在所有车辆的初始位置, 该方法的有效性已经被文献<sup>[6]</sup>证明. 不同的模型有着不同的平衡状态, Gipps 模型和改进的基于安全距离的车辆跟驰模型的平衡状态分别定义为

$$-b_n \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) +$$

$$\sqrt{b_n^2 \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right)^2 + b_n \left( 2(h^* - S) + \frac{(v^*)^2}{b_{n-1}} - v^* \tau \right)} - v^* = 0 \quad (19)$$

$$-b_n \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right) + \sqrt{b_n^2 \left( \frac{\tau}{2} + \theta \right)^2 + b_n \left( \frac{4(h^* - S)}{\beta_1 + \beta_2} + \frac{(v^*)^2}{b_{n-1}} - v^* \tau \right)} - v^* = 0 \quad (20)$$

从式(19)和式(20)可以计算出在平衡状态下某一速度  $v^*$  对应的相邻车辆之间的车头间距  $h^*$ .

为了分析模型对于干扰在宏观上的处理方式, 在当仿真步长等于 2 时, 给所有车辆的位置加一个扰动, 该扰动是一个在  $(-5, 5)$  均匀分布的随机量. 运行仿真, 观测扰动在车队中的传递过程.

### 4.2 改进模型的宏观特性分析

实验 1 使用标定得到的参数, 交通流趋于稳定

本实验中先使用标定好的参数进行仿真, 观测在当前数据环境下交通流的状态变化情况. 实验结果用 2 个形式来表现, 分别是车头间距图和车辆的时空轨迹图, 如图 3 和图 4 所示. 从图 3 可以看出所加的扰动随着时间的发展很快消散了, 所有车辆的车头间距都保持相同, 出现了稳定交通流的状态. 图 4 中的车辆时空轨迹数据也证明了这一点, 可以看出, 每个车辆的轨迹数据在  $t = 50$  后都趋于平行, 也就是说车辆的加速度为 0, 所有车的速度都变得相同. 实验 1 成功地仿真出了交通流的平衡状态, 也就是宏观上稳定交通流.

实验 2 改变部分参数的值, 交通流变得不稳定

改变部分标定得到的参数, 观察交通流的变化情况, 图 5 和图 6 给出了仿真的结果. 从图 5 中的车头间距变化可以看出, 该环境下车流的发展过程



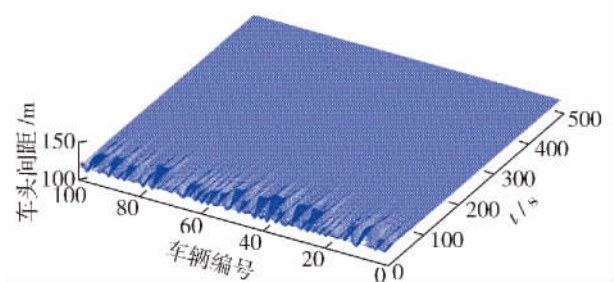


图3 实验1中车头间距随着时间的变化情况

Fig. 3 Headway variation with time in experiment 1

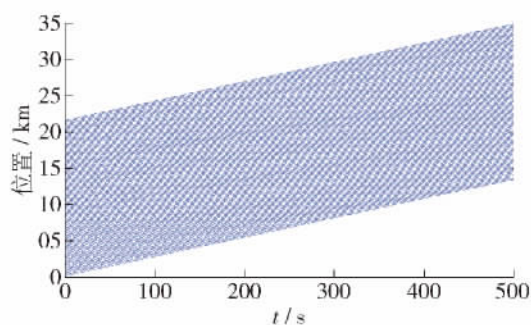


图4 实验1中所有车辆的时空轨迹图

Fig. 4 Trajectory plot of all vehicles in experiment 1

是波形的,也就是说,在初期所加的扰动并没有随着时间的推延而消散,而是造成了交通流的不稳定,出现了冲击波.从图6的车辆时空轨迹图中能看到深浅不一的条纹,这说明各车之间的轨迹线不再平行,也就是加速度不等于0了,造成了车速的变化,最终引发了冲击波.

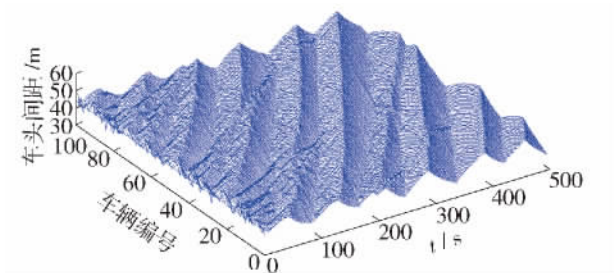


图5 实验2中车头间距随着时间变化的情况

Fig. 5 Headway variation with time in experiment 2

从实验1和实验2可以看出,仿真结果证明了改进的基于安全距离的车辆跟驰模型不仅在统计意义上有着良好的效果,而且能成功模拟出2种十分普遍的宏观交通流现象:稳定交通流和冲击波.综上可以证明:改进的基于安全距离的车辆跟驰模型是一个相对精确的能在一定程度上成功再现交通流实际情况的模型.

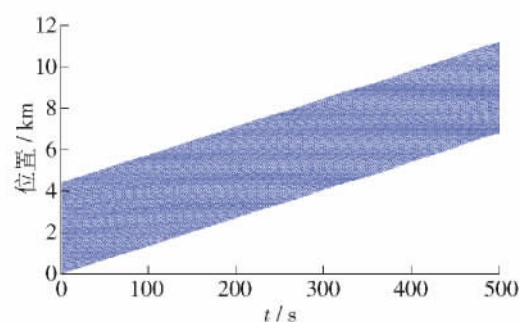


图6 实验2中所有车辆的时空轨迹图

Fig. 6 Trajectory plot of all vehicles in experiment 2

#### 4.3 改进模型的稳定性作用

实验1和实验2证明了改进模型在宏观上的再现能力,然而还没有证明其在宏观上相对Gipps模型的优越之处,所以设计了仿真实验3来分析改进模型在宏观上的优点.

实验3 保持2个模型共同参数的值也相同,改进的模型相对原模型有稳定交通流的作用

在参数设定时选择了可以使Gipps模型产生不稳定交通流的参数,并保持Gipps模型和改进模型共同参数的值相同,运行仿真实验,并比较Gipps模型的时空轨迹图和改进模型的时空轨迹图,如图7和图8所示.从图7可看出该参数集使得Gipps模型下的交通流是不稳定的;然而对比图8可以发现,在改进模型中交通流变得稳定了,也就是说,新模型较Gipps模型有使交通流变稳定的能力.这是改进模型在宏观上优于Gipps模型的重要特点.

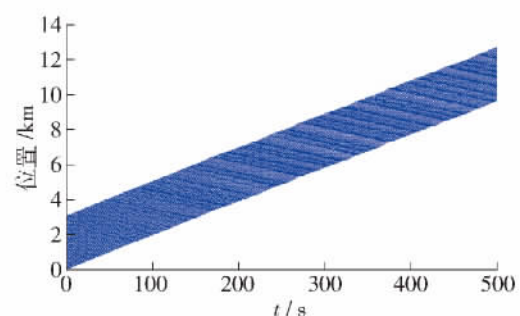


图7 实验3中Gipps模型的时空轨迹图

Fig. 7 Trajectory plot of Gipps' model in experiment 3

## 5 结论

1) 改进的基于安全距离的车辆跟驰模型相对Gipps模型在统计意义上有更高的精度;

2) 改进的基于安全距离的车辆跟驰模型可以再现宏观交通流中稳定状态的交通流以及冲击波等宏观现象;

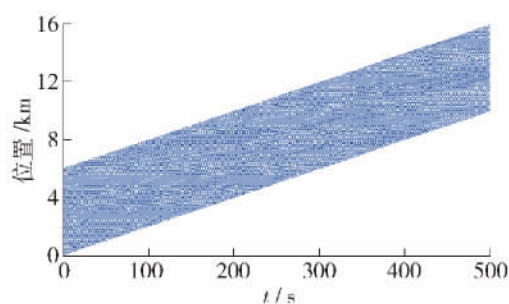


图8 实验3中改进模型的时空轨迹图

Fig. 8 Trajectory plot of proposed model in experiment 3

3) 改进的模型相对于原 Gipps 模型有更好的稳定交通流的效果,在宏观交通流上更有优势.

#### 参考文献:

- [1] BRACKSTONE M, MCDONALD M. Car-following: a historical review [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 1999, 2(4): 181-196.
- [2] GIPPS G. A behavioural car-following model for computer simulation [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105-111.
- [3] WILSON E. An analysis of Gipps's car-following model of highway traffic [J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 2001, 66(5): 509-537.
- [4] RAKHA H, PECKER C, CYBIS B. Calibration procedure for Gipps car-following model [J]. Transportation Research Record, 2007, 1999(1): 115-127.
- [5] OSSEN S, HOOGENDOORN P, GORTE H. Interdriver differences in car-following: a vehicle trajectory-based study [J]. Transportation Research Record, 2006, 1965(1): 121-129.
- [6] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations [J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1805-1824.
- [7] HELL Y W. Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow [C] // Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors. New York: Elsevier. 1959: 207-238.
- [8] PUNZO V, SIMONELLI F. Analysis and comparison of microscopic traffic flow models with real traffic microscopic data [J]. Transportation Research Record, 2005, 1934(1): 53-63.
- [9] BROCKFELD E, KÜHNE D, WAGNER P. Calibration and validation of microscopic models of traffic flow [J]. Transportation Research Record, 2005, 1934(1): 179-187.
- [10] YANG H, GAN Q J, JIN W L. Calibration of a family of car-following models with retarded linear regression methods [C/CD] // Presented at 90th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2011.
- [11] HAMDAR H, TREIBER M, MAHMASSANI S. Calibration of a stochastic car-following model using trajectory data: exploration and model properties [C/CD] // The 88th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2009.
- [12] 王殿海, 陶鹏飞, 金盛, 等. 跟驰模型参数标定及验证方法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(1): 59-65.  
WANG Dian-hai, TAO Peng-fei, JIN Sheng, et al. Method of calibrating and validating car-following model [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(1): 59-65. (in Chinese)
- [13] JIN S, WANG D H, HUANG Z Y, et al. Visual angle model for car-following theory [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 390(1): 1931-1940.
- [14] WILSON E. An analysis of Gipps's car following model of highway traffic [J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 2001, 66(5): 509-537.
- [15] 金盛, 王殿海. 考虑前方交通状态的车辆跟驰模型与数值仿真 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(8): 1236-1241.  
JIN Sheng, WANG Dian-hai. Car following model and simulation considering front traffic situation [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8): 1236-1241. (in Chinese)
- [16] MASON D, WOODS W. Car-following model of multispecies systems of road traffic [J]. Physical Review E, 1997, 55(3): 2203-2214.

(责任编辑 张 蕾)