

各异性 FVD 模型及数值模拟

王昊, 王炜

(东南大学 交通规划与管理江苏省重点实验室, 南京 210096, haowang@seu.edu.cn)

摘要: 为了使跟驰模型能够描述驾驶人行为差异, 基于不同气质类型驾驶人的行为差异分析, 建立了跟驰模型参数与驾驶人气质状况之间的关系, 通过引入气质激进度变量, 将跟驰模型参数表达为气质激进度的函数, 并在改进 FVD 模型的基础上, 提出了体现驾驶人行为差异的各异性 FVD 模型. 该模型克服了传统规范模型无法描述驾驶人个体行为差异的缺点. 数值模拟实验结果表明该模型能够成功地模拟稠密交通流中小扰动传播演化结果的随机性现象. 该模型结构简单, 且参数易于确定, 一方面为驾驶行为各异性的建模建立了理论基础, 同时也为微观交通流动态随机特性模拟提供了一般性的方法.

关键词: 交通工程; 各异性跟驰模型; 跟驰理论; 扰动传播; 数值模拟

中图分类号: U491.112

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0138-05

Heterogeneous FVD model and numerical simulation

WANG Hao, WANG Wei

(Jiangsu Provincial Key Lab of Transportation Planning and Management, Southeast University, Nanjing 210096, China, haowang@seu.edu.cn)

Abstract: This paper establishes the relationships between parameters of car-following model and temperament of drivers, based on the analysis of differences among driving behaviors of drivers with different temperaments. A new variable called aggressiveness level is introduced to the car-following model, in which model parameters can be expressed as functions with regard to human temperament. Based on improved FVD model, a heterogeneous car-following model is proposed, which overcomes the shortcomings of traditional normative models that can not describe the differences of driving behaviors among drivers. Numerical simulations show that the heterogeneous model can simulate the randomness of the developments of small perturbation propagation in dense traffic flow successfully. The proposed model has a straightforward structure and easy-determined parameters. It appears promising for formulating the individual attributes of drivers and also presents a general way to simulate traffic dynamics and randomness efficiently and simply.

Key words: traffic engineering; heterogeneous car-following model; car-following theory; perturbation propagation; numerical simulation

跟驰模型作为一种基本的微观交通流模型已经有 60 多年的发展历史了. 在跟驰模型的发展过程中, 几乎所有的模型都是基于标准驾驶行为建立的, 这种模型称为规范模型 (normative mod-

els)^[1]. 然而, 实际交通流中不同驾驶人的行为存在着差异, 这种驾驶人个体之间的差异在交通流的随机性和不确定性特征中扮演着重要角色. 由于规范模型忽略了驾驶人个体行为的差异, 因而难以对交通流的动态随机性和不确定性特征进行描述. 为此, 本文基于 FVD 模型^[2], 提出一种体现驾驶行为各异性的跟驰模型, 用于描述交通流的随机性和不确定性特征, 并给出模型参数的确定方法以及相关数值模拟实验的结果.

收稿日期: 2008-10-02.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2007BAK35B02); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB705501).

作者简介: 王昊(1980—), 男, 博士, 讲师;

王炜(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

1 FVD 模型

FVD 模型是姜锐等近年来在广义力 (GF) 模型基础上提出的一个更为全面的新模型,其动力学方程^[3]为

$$\frac{d}{dt}v_n(t) = \kappa[V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)] + \frac{\lambda}{\Delta x_n(t)}\Delta v_n(t). \quad (1)$$

式中: V 为优化速度函数, $\Delta x_n(t)$ 为车辆 n 与前车 $n-1$ 之间的车头距离, $v_n(t)$ 为车辆 n 的当前速度, $\Delta v_n(t)$ 为车辆 n 与车辆 $n-1$ 之间的速度差, κ 与 λ 为敏感系数. 注意到方程(1)右边的前半部分与优化速度模型^[4]相同、后半部分与经典的 GHR 跟驰模型^[1]相同,因此 FVD 模型可视为优

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}v_n(t) = \kappa[V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)], & \text{if: } v_n(t) = V_n^{(des)} \ \& \ \Delta v_n(t) \geq 0; \\ \frac{d}{dt}v_n(t) = \kappa[V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)] + \frac{\lambda}{\Delta x_n(t)}\Delta v_n(t), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $V_n^{(des)}$ 为驾驶人 n 的期望速度.

大量研究成果表明驾驶人对前车减速的刺激反应要强于加速刺激反应,即车辆的加速过程和减速过程是非对称的. 因此,式(2)中的敏感系数 κ 和 λ 在加速和减速过程中应取不同值:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda^{(a)}: \Delta v \geq 0 \\ \lambda^{(d)}: \Delta v < 0 \end{cases}, \kappa = \begin{cases} \kappa^{(a)}: V(\Delta x) - v \geq 0 \\ \kappa^{(d)}: V(\Delta x) - v < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:上标^(a)和^(d)分别表示加速过程和减速过程.

优化速度函数 $V(\Delta x)$ 是 FVD 模型的重要组成部分,为了便于与驾驶行为建立联系,优化速度函数的参数个数应尽可能少,且具有明显的交通学意义. 为此,本文选用 Newell 模型^[5]的优化速

度速度模型与经典跟驰模型的复合模型. FVD 模型的这种复合结构使其能够有效地结合优化速度模型和经典跟驰模型各自的优点,因而对跟驰运动的描述更为全面,能够准确地模拟交通流的启动波速^[2]以及其他常见的交通现象.

2 各异性跟驰模型

2.1 模型的动力学方程

为了使模型能够体现个体驾驶人行为之间的差异,首先需要对 FVD 模型进行改进. 事实上,当考虑驾驶人个体差异时,方程(1)右边的速度差项并不总是必需的:当驾驶人已达到其期望车速时,即使车速仍小于前车速度也不会继续加速. 因此,FVD 模型的动力学方程(1)可改进为

度函数代替原 FVD 模型中的双曲正切函数.

$$V(\Delta x) = V^{(des)} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\alpha}{V^{(des)}}(\Delta x - \Delta X^{(j)}) \right] \right\}. \quad (4)$$

式中: α 为与启动波速相关的系数, $\Delta X^{(j)}$ 为交通堵塞状态的车头间距. 方程(2)~(4)构成各异性跟驰模型的动力学方程.

2.2 基于驾驶行为各异性的参数表达

驾驶人按照气质类型简单分为两类:激进型驾驶人和保守型驾驶人. 这两类驾驶人在各种不同交通状况下的驾驶行为存在明显差异,这些差异可以通过相应的模型参数反映出来,如表1所示.

表1 气质类型对驾驶行为的影响

交通过程(状态)	数学描述	过程特征参数	驾驶行为	
			激进型	保守型
稳态	$V_n(\Delta x_n) = v_n$	$\Delta X^{(j)}, V^{(des)}, \alpha$	倾向于采用较短的车头间距	倾向于采用较长的车头间距
慢于前车	$\Delta v_n > 0$	$\lambda^{(a)}$	急于加速,缩小与前车速度差	不急于加速
快于前车	$\Delta v_n < 0$	$\lambda^{(d)}$	不急于立即采用强烈的制动	立即采用强烈的制动
逼近过程	$V_n(\Delta x_n) > v_n$	$\kappa^{(a)}$	急于缩小间距,使用较大的加速度	不急于缩小间距,使用较小的加速度
后撤过程	$V_n(\Delta x_n) < v_n$	$\kappa^{(d)}$	不急于减速	急于减速,增大与前车之间的距离

2.2.1 模型参数与气质类型相关性分析

2.2.1.1 参数 $\kappa^{(a)}$ 与 $\kappa^{(d)}$

考虑初始条件: $\Delta v_n = 0, V(\Delta x_n) > v_n$. 此时

模型退化为优化速度模型. 参数 $\kappa^{(a)}$ 反映了驾驶人对缩小与前车之间的间距的急切程度. $\kappa^{(a)}$ 值越大,表明驾驶人为缩小跟车间距所使用的加速

度越大, 驾驶人的气质也越激进.

类似地, 考虑初始条件: $\Delta v_n = 0, V(\Delta x_n) < v_n$. 此时驾驶人应适当减速, 以缓和与前车之间过近的距离. 参数 $\kappa^{(d)}$ 反映了驾驶人对缓和与前车之间过近距离的急切程度. $\kappa^{(d)}$ 值越大, 表明驾驶人使用的减速度越大, 其气质也越保守.

2.2.1.2 参数 $\lambda^{(a)}$ 与 $\lambda^{(d)}$

考虑初始条件: $V(\Delta x_n) = v_n, \Delta v_n > 0$. 此时模型退化为最简单的经典跟驰模型. 参数 $\lambda^{(a)}$ 体现了驾驶人对前车加速的反应. $\lambda^{(a)}$ 值越大, 表明驾驶人为缩小与前车速度差所使用的加速度越大, 驾驶人的气质越激进.

类似地, 考虑初始条件: $V(\Delta x_n) = v_n, \Delta v_n < 0$. 此时参数 $\lambda^{(d)}$ 体现了驾驶人对前车减速的反应. $\lambda^{(d)}$ 值越大, 表明驾驶人为避免与前车碰撞所使用的减速度越大, 其气质也越保守.

2.2.1.3 优化速度函数中的参数 $\alpha, \Delta X^{(j)}$ 及 $V_n^{(des)}$

文献[6]基于交通流基本图特征以及驾驶行为分析, 推导出 Newell 模型中的参数 α :

$$\alpha = \frac{C^{(j)}}{\Delta X^{(j)}} = \frac{1}{\Delta \tau}. \quad (5)$$

式中: $C^{(j)}$ 为启动波速, $\Delta \tau$ 为交通流启动波在相邻车辆间传播的时间, 即车辆启动的反应延迟. 由式(5)可知参数 α 与反应延迟程度成反比, 反应延迟时间越短意味着驾驶人启动加速越急切. 因此, α 值越大, 驾驶人的气质越为激进.

相比而言, 参数 $\Delta X^{(j)}, V_n^{(des)}$ 与驾驶人气质之间的关系较易判断. 显然, 气质类型越激进的驾驶人其堵塞时与前车之间的车头间距 $\Delta X^{(j)}$ 越小, 而其自由流状态下的期望则速度 $V_n^{(des)}$ 越大.

2.2.2 参数的函数表达

以上模型参数与气质类型相关性的分析表明, 参数 $\alpha, V_n^{(des)}, \kappa^{(a)}$ 及 $\lambda^{(a)}$ 与驾驶人的气质激进程度正相关, 而参数 $\Delta X^{(j)}, \kappa^{(d)}$ 及 $\lambda^{(d)}$ 与驾驶人的气质激进程度负相关. 为了能够量化模型参数与驾驶人气质状况的关系, 引入一个描述驾驶人气质激进程度的变量“气质激进度”, 记为 γ . 定义气质激进度 γ 在驾驶人群中服从标准正态分布, 即 $\gamma \sim N(0, 1)$, 则 $\gamma > 0$ 表示驾驶人气质为激进型, $\gamma < 0$ 表示驾驶人气质为保守型, 而 $\gamma = 0$ 表示驾驶人为完全理性(或严格标准型)驾驶人. 大量研究成果表明, 跟驰模型的参数在驾驶人群中服从正态分布^[7]. 于是, 模型的各参数均可以表达为气质激进度 γ 的函数:

$$\begin{cases} \alpha(\gamma) = \bar{\alpha} + \gamma\sigma_{\alpha}, \\ \Delta X^{(j)}(\gamma) = \overline{\Delta X^{(j)}} - \gamma\sigma_{\Delta X}, \\ V^{(des)}(\gamma) = \overline{V^{(des)}} + \gamma\sigma_V, \\ \kappa^{(a)}(\gamma) = \overline{\kappa^{(a)}} + \gamma\sigma_{\kappa}, \\ \kappa^{(d)}(\gamma) = \overline{\kappa^{(d)}} - \gamma\sigma_{\kappa}, \\ \lambda^{(a)}(\gamma) = \overline{\lambda^{(a)}} + \gamma\sigma_{\lambda}, \\ \lambda^{(d)}(\gamma) = \overline{\lambda^{(d)}} - \gamma\sigma_{\lambda}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: 上标“—”表示各参数的均值, σ 为各参数的标准差. 虽然参数 $\kappa^{(a)}$ 与 $\kappa^{(d)}$ 取值不同, 但由于两者属同一数量级, 故可采用相同的标准差以减少模型的参数个数. 对于参数 $\lambda^{(a)}$ 与 $\lambda^{(d)}$ 同样如此.

至此, 驾驶人行行为的各异性可由方程(2)、(3)、(4)及(6)构成的新模型进行描述, 称这种能够反映驾驶人个体行为特征的新跟驰模型为各异性跟驰模型.

2.3 参数的标定

各异性跟驰模型的参数可分为两类, 一类为参数在驾驶人群中的分布均值, 另一类为参数在驾驶人群中分布的标准差. 下面将分别介绍这两类参数的标定方法以及合理的取值范围.

2.3.1 参数的均值

2.3.1.1 优化速度函数的参数 $\bar{\alpha}, \overline{\Delta X^{(j)}}$ 及 $\overline{V_n^{(des)}}$

优化速度函数本质上描述的是稳态交通流的平衡速度-密度关系, 因此优化速度函数的参数均值 $\bar{\alpha}, \overline{\Delta X^{(j)}}$ 及 $\overline{V_n^{(des)}}$ 可通过稳态交通流数据进行标定. 对此文献[8]做了详细介绍.

堵塞状态的车头距离 $\Delta X^{(j)}$ 的取值范围一般认为是 5 ~ 8 m. 期望速度均值 $\overline{V_n^{(des)}}$ 的影响因素较多, 取值应视具体情况而定.

对于 $\bar{\alpha}$ 的合理取值范围可通过式(5)确定. 文献[6]指出合理的启动波波速应分布在 17 ~ 23 km/h. 因此, 由式(5)不难得出 $\bar{\alpha}$ 的取值范围为 0.59 ~ 1.28 s⁻¹. 另一方面, 驾驶人启动反应延迟时间 $\Delta \tau$ 的取值通常分布在 0.75 ~ 1.14 s^[7], 由式(5)同样可得到 $\bar{\alpha}$ 的取值范围为 0.88 ~ 1.33 s⁻¹. 综合以上两方面, 本文建议 $\bar{\alpha}$ 的合理取值范围为 0.6 ~ 1.4 s⁻¹.

2.3.1.2 参数 $\overline{\kappa^{(a)}}, \overline{\kappa^{(d)}}, \overline{\lambda^{(a)}}$ 及 $\overline{\lambda^{(d)}}$

这4个表征车辆跟驰运动动力学特性的特征参数, 本文采用交通流动态特性数值模拟的方法来确定参数合理的取值范围.

考虑到交通流的启动波波速值的分布范围较为稳定可靠, 本文选取静止车队启动加速过程进行

数值模拟. 模拟初始条件: 当 $t < 0$ 时, 交通信号为红灯, 除头车以外所有车辆的车头距均为 7 m, 速度为 $V(7) = 0$, 头车的车头距为 $+\infty$, 速度为 0; 当 $t = 0$ 时, 绿灯开启, 车辆开始启动, 车辆最大速度限制为 $\overline{V^{(des)}} = 15$ m/s, 车队规模为 11 辆车. 根据模拟的初始条件, 头车的启动加速度为

$$\frac{d}{dt}v(0) = \overline{\kappa^{(a)}} [V(+\infty) - 0] = \overline{\kappa^{(a)}} \overline{V^{(des)}}. \quad (7)$$

实际观测表明, 静止车辆的启动加速度一般在 $2 \sim 4$ m/s². 因此, 由式(7)可得出参数 $\overline{\kappa^{(a)}}$ 的取值范围为 $0.133 \sim 0.267$ s⁻¹.

对于车辆加速和减速的不平衡性, 文献[9]发现相对速度为负时的减速度其绝对值大于相对速度为正时的加速度值, 且前者与后者的平均比值为 1.1. 因此, 可对各异性模型中参数 $\overline{\kappa^{(a)}}$ 、 $\overline{\kappa^{(d)}}$ 、 $\overline{\lambda^{(a)}}$ 及 $\overline{\lambda^{(d)}}$ 之间存在的关系做如下简化:

$$\frac{\overline{\kappa^{(d)}}}{\overline{\kappa^{(a)}}} = \frac{\overline{\lambda^{(d)}}}{\overline{\lambda^{(a)}}} = 1.1. \quad (8)$$

根据以上条件, 通过改变模型参数 $\overline{\kappa^{(a)}}$ 与 $\overline{\lambda^{(a)}}$, 反复对车队启动过程进行数值模拟, 可以得出启动波速符合实际观测结果的模型参数取值范围为: $\overline{\kappa^{(a)}} \in (0.133, 0.267)$, $\overline{\kappa^{(d)}} \in (0.146, 0.294)$, $\overline{\lambda^{(a)}} \in (3, 9)$, $\overline{\lambda^{(d)}} \in (3.3, 9.9)$. 图1显示了 $\overline{\alpha} = 1.4$ 、 $\overline{\kappa^{(a)}} = 0.26$ 、 $\overline{\kappa^{(d)}} = 0.28$ 、 $\overline{\lambda^{(a)}} = 5$ 、 $\overline{\lambda^{(d)}} = 5.5$ 时的车队启动模拟结果, 车辆运动延迟时间为 1.32 s, 启动波速为 5.17 m/s (18.6 km/h).

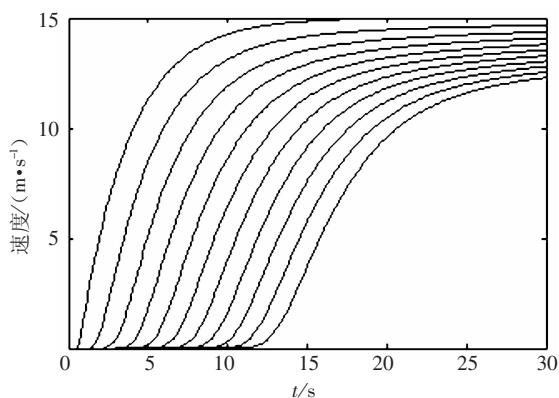


图1 静止车队启动过程数值模拟

2.3.2 参数的标准差

参数标准差 σ 同样可以通过对个体车辆运动特性的大样本量调查获得, 本文采用一种简单的方法确定参数合理的标准差取值. 即: 保证绝大多数的个体驾驶人的参数值分布在合理的范围内. 因此, 可以依据上节确定的各参数合理取值范围估计参数的标准差. 以参数 α 为例, 当置信度为

95% 时, 保证大部分个体驾驶人参数 α 分布在合理范围 $[0.6, 1.4]$ 内, 须满足:

$$(\overline{\alpha} + 2\sigma_{\alpha}) - (\overline{\alpha} - 2\sigma_{\alpha}) = 1.4 - 0.6. \quad (9)$$

于是可以得到参数 α 合理的标准差为 $\sigma_{\alpha} = 0.2$. 类似地, 可以得到其他参数的标准差取值: $\sigma_{\kappa} = 0.034$, $\sigma_{\lambda} = 1.5$, $\sigma_X = 0.75$. 驾驶人期望车速 $V^{(des)}$ 由于影响因素较多, 宜根据特定的交通条件确定, 本文不给出建议值.

3 数值模拟

为了验证各异性模型的合理性以及在描述交通流动态随机性特性方面的有效性, 本文基于各异性模型对稠密交通流的小扰动传播现象作了数值模拟. 众多交通流实测结果表明, 稠密交通流条件下小扰动会以波的形式沿着交通流向上游方向传播, 且小扰动在交通流中的传播有 3 种不同的发展结果: 稳定传播、耗散和放大. 文献[10]指出, 小扰动发展为这 3 种结果具有随机性, 而驾驶行为的各异性是导致扰动发展随机性的主要原因. 这种扰动发展结果的随机性用传统的规范性模型是无法描述的, 各异性跟驰模型考虑了个体驾驶人行为的差异性, 因此能够成功地描述该类问题. 文献[10]给出高速公路上扰动在稠密交通流条件下传播的 3 种不同的时空轨迹. 实测表明, 交通流在扰动前的速度大致在 11 m/s (40 km/h) 左右, 扰动传播的速度大致在 5.7 m/s (20 km/h) 左右, 扰动持续时间在 8 s 左右.

应用各异性跟驰模型对上述现象进行数值模拟, 参数选择如下: $\overline{\alpha} = 1.4$, $\overline{\kappa^{(a)}} = 0.26$, $\overline{\kappa^{(d)}} = 0.28$, $\overline{\lambda^{(a)}} = 5$, $\overline{\lambda^{(d)}} = 5.5$, $\Delta X^{(j)} = 7$, $\overline{V^{(des)}} = 15$, $\sigma_{\alpha} = 0.15$, $\sigma_{\kappa} = 0.022$, $\sigma_{\lambda} = 1.0$, $\sigma_X = 0.5$, $\sigma_V = 1.0$. 模拟车队的规模为 40 辆车, 初始时刻, 各车辆的速度均为 12 m/s, 车头间距由以下方程确定:

$$\Delta x_n = \Delta X_n^{(j)} - \frac{V_n^{(des)}}{\alpha_n} \ln \left(1 - \frac{V}{V_n^{(des)}} \right). \quad (10)$$

上式为优化速度函数的反函数, 其中 V 为车队初始速度: $V = 12$ m/s. 头车在 $t = 0$ 时刻的位置为 $x(t) = 0$, 头车匀速运动至第 8 s 开始受到扰动, 并以 $a = -3$ m/s² 的减速度减速 3 s, 扰动持续 7 s 后解除, 头车于第 18 s 开始以 $a = 3$ m/s² 的加速度加速 3 s 恢复至扰动前的速度, 尔后保持匀速运动. 模拟程序的时间步长采用 0.1 s, 模拟时间为 80 s, 不改变参数的情况下, 反复进行 50 次模拟实验, 发现类似图 2 中的 3 种不同的扰动传播现象均有出现, 其中扰动在传播过程中放大的情形出现

14次,耗散的情形出现8次,稳定传播的情形出现28次.图2给出了3种典型的数值模拟结果.

模拟实验得到的扰动传播速度都在 6.1 m/s

(22 km/h)左右,与文献[10]中的实际观测值相符.

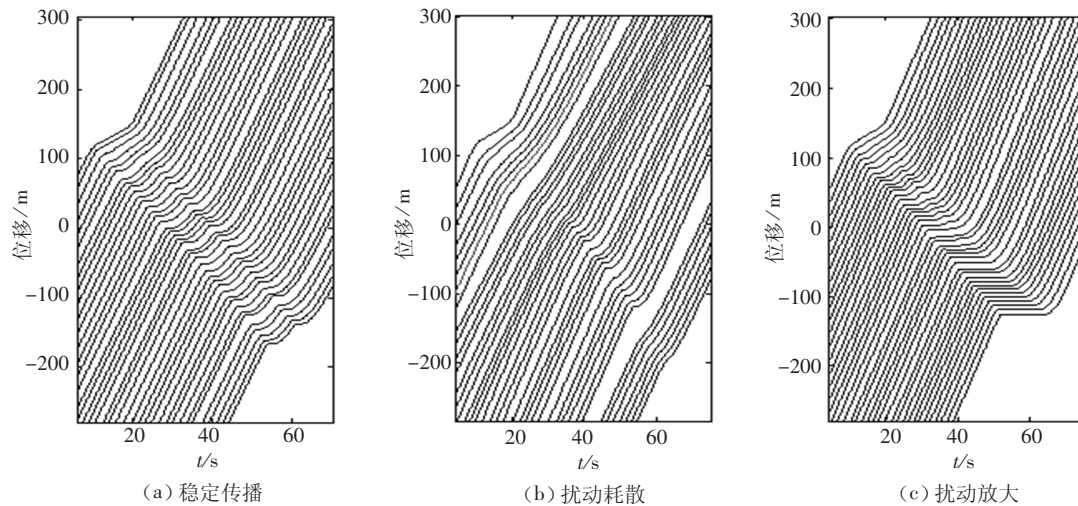


图2 稠密交通中扰动传播的数值模拟

4 结 论

本文在考虑交通流个体差异的基础上改进了FVD模型.分析了激进型驾驶人和保守型驾驶人在不同交通条件下驾驶行为的差异,引入了描述驾驶人气质状况的变量——气质激进度,并建立了FVD模型中各参数与气质激进度之间的函数关系,从而得到一个新的各异性FVD模型.进一步,文章还给出了各异性跟驰模型参数的标定方法以及合理的取值范围.论文最后应用各异性FVD模型对稠密交通条件下小扰动演化结果的随机性做了数值模拟,得出了与实际观测相一致的结果,验证了各异性跟驰模型的合理性和有效性.论文提出的各异性跟驰模型结构简单,且模型参数易于确定,一方面为驾驶行为各异性的建模建立了理论基础,同时也为微观交通流动态随机特性的模拟提供了一般性方法.由于该各异性模型是基于FVD模型发展来的,因此模型中没有反应延迟项,将个体驾驶人反应延迟的差异引入各异性跟驰模型将是今后进一步的研究方向.

参考文献:

- [1] BRACKSTONE M, MCDONALD M. Car-following: a historical review[J]. Transportation Research F, 1999, 2(4): 181–196.
- [2] JIANG Rui, WU Qingsong, ZHU Zuojin. Full velocity difference model for car-following theory[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 017101–1–017101–4.
- [3] JIANG Rui, WU Qingsong. First and second order phase transition from free flow to synchronized flow[J]. Physica A, 2003, 322: 676–684.
- [4] BANDO M. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. Physical Review E, 1995, 51(2): 1035–1024.
- [5] NEWELL G F. Nonlinear effects in the dynamics of car following[J]. Operations Research, 1961, 9: 209–229.
- [6] DEL CASTILLO J M, BENITEZ F G. On the functional form of the speed-density relationship – I: general theory[J]. Transportation Research B, 1995, 29(5): 373–389.
- [7] NATHAN H G, CARROLL J M, AJAY K R. Traffic flow theory[R]. Washington DC: TRB, 1997.
- [8] DEL CASTILLO J M, BENITEZ F G. On the functional form of the speed-density relationship – II: Empirical investigation[J]. Transportation Research B, 1995, 29(5): 391–406.
- [9] HERMAN R, ROTHERY R W. Car following and steady state flow [C]//Proceedings, Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow. London: OCED, 1965: 1–11.
- [10] DEL CASTILLO J M. Propagation of perturbations in dense traffic flow: a model and its implications [J]. Transportation Research B, 2001, 35(4): 367–389.

(编辑 赵丽莹)