

智能网联信息下车辆跟驰模型构建及行为影响分析

王文璇¹, 阎莹¹, 吴兵²

(1. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 基于传统跟驰模型提出考虑多前车速度和加速度信息影响的跟驰模型, 根据车辆轨迹信息对跟驰模型参数标定, 探究多前车信息对本车运行在交通安全和效率方面的影响以及协同自适应巡航 (cooperative adaptive cruise control, CACC) 车辆在不同渗透率下对交通安全和效率的影响。结果表明: 除了紧邻前车外, 多前车的运动信息会对后车的运动造成影响; 考虑多前车的速度和加速度反馈会提高交通安全和效率; CACC 车辆对交通安全和效率的影响与 CACC 渗透率和排列方式有很大关系。

关键词: 跟驰模型; 参数标定; 智能网联; 数值仿真

中图分类号: U491

文献标志码: A

Development and Performance of a Cooperative Adaptive Cruise Control Car-following Model

WANG Wenxuan¹, YAN Ying¹, WU Bing²

(1. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A microscopic traffic flow model was proposed based on a traditional car-following model with the consideration of the effects of multiple preceding cars' velocity and acceleration; then the parameters of car-following models were calibrated on the basis of the vehicle trajectory; Subsequently, the impact of multiple preceding vehicles information on traffic safety and efficiency were also investigated; finally, the influence of cooperative adaptive cruise control (CACC) vehicles on traffic safety and efficiency with different penetration rates were also studied. Simulation results prove that except for the immediately preceding vehicle, multiple preceding vehicles' information in the control strategy of the CACC

system would have an impact on the following vehicle; the consideration of the velocity and acceleration of multiple preceding vehicles can improve traffic safety and efficiency; the impact of CACC on traffic safety and efficiency was highly related to the penetration rate and arrangement of CACC vehicles.

Key words: car-following model; calibration and validation; cooperative adaptive cruise control(CACC); numerical simulation

随着车车 (V2V) 通信^[1] 的发展, 智能网联车辆因其对交通性能的提升作用而受到很多关注^[2]。目前车辆上搭载的广泛应用的驾驶辅助系统主要包括自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC) 系统以及协同自适应巡航控制 (cooperative adaptive cruise control, CACC) 系统。CACC 技术在 ACC 的基础上通过 V2V 可以在通信范围内与车队中多辆前方 CACC 车辆传输信息^[3]。

CACC 跟驰模型最早由加州 PATH 计划 (partners for advanced transportation technology program) 基于恒定车间距控制策略提出的, 在提高道路通行能力和交通稳定性方面具有巨大潜力^[4-5], 并得到了广泛应用^[6]。另外有一些 CACC 跟驰模型使用传统车辆跟驰模型来描述车辆行为^[7], 通过 V2V 通信功能从通信范围内的多个前车获取运动信息^[3, 8], 具体包括速度差^[3, 9-10]、加速度差^[9]、间距^[10]、加速度^[3]等参数, 前车信息对目标车辆的影响是通过权重及敏感系数得到的, 而它们一般是直接给出确定值或通过比较给定的若干值得到结果^[11-12], 并没有提出确定前车影响的合理框架。因此, 有必要对 CACC 跟驰模型中多前车对目标车辆运行影响的权重及敏感系数进行研究以获得其最佳取值。

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (52172331); 陕西省重点研发计划 (2021KWZ-09)

第一作者: 王文璇 (1992—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为智能网联车辆技术, 交通流理论。

E-mail: wangwenxuan123@chd.edu.cn

通信作者: 吴兵 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通控制, 交通拥挤管理。

E-mail: wubing@tongji.edu.cn



本文提出了一种新的CACC车辆跟驰模型,新模型考虑了通信距离内多辆前车信息对目标车辆的影响;然后基于高精度车辆轨迹数据确定多辆前车对目标车辆的影响;之后通过仿真手段探究CACC车辆行为对混合交通流安全和效率的影响。

1 车辆跟驰模型

1.1 人工驾驶车辆跟驰模型选取

自2015年基于场论的跟驰模型——纵向控制模型(longitudinal control model, LCM)^[13]被提出后,其在实践中得到了广泛应用^[14-17]。LCM具有其独特的特点:需要标定的参数中没有无物理含义的指数或系数。除式(2)中来自于Gipps模型的距离表达式,距离项还可考虑不同跟驰安全规则。常见的纵向交通场景如起步、跟驰、刹车等都可以通过一个方程来实现。微观方程和宏观模型可互相转化,此模型在微观层面上有良好的物理基础,可以模拟每辆车的行为,还可以集计到宏观层面反映交通流的行为^[18]。因此,本文选择LCM作为人工驾驶车辆(human-driving vehicles, HV)的跟驰模型。

$$a_n(t + \tau_n) = A_n \left[1 - \frac{v_n(t)}{v_n^f} - e^{-\frac{s_{n-1,n}(t)}{s_{n-1,n}^*(t)}} \right] \quad (1)$$

$$s_{n-1,n}^*(t) = \frac{v_n^2(t)}{2b_n} - \frac{v_{n-1}^2(t)}{2B_{n-1}} + v_n(t)\tau_n + l_n \quad (2)$$

式中: $a_n(t + \tau_n)$ 是第 n 辆车在 $t + \tau_n$ 时刻的加速度; τ_n 是车辆 n 驾驶人的感知反应时间; A_n 是车辆 n 从静止开始起步的最大加速度; $v_n(t)$ 是车辆 n 在 t 时刻速度; v_n^f 是车辆 n 的期望速度,即自由流速; $s_{n-1,n}(t)$ 是车辆 n 和 $n-1$ 的跟车间距, $s_{n-1,n}(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$; $x_n(t)$ 是车辆 n 在 t 时刻的位置; $s_{n-1,n}^*(t)$ 是 $s_{n-1,n}(t)$ 的期望值。 l_n 是车辆 n 的有效长度(指实际车辆长度与一定缓冲间距之和); b_n 是车辆 n 在紧急事件中采取的减速度; B_{n-1} 是车辆 n 对前车 $n-1$ 紧急减速度的估计值。

1.2 考虑多前车信息的车辆跟驰模型选取

在车辆驾驶过程中,驾驶人对车辆的操作行为受到多辆前车的运动影响^[19],尤其对于未来随着智能环境的搭建,车辆通信距离增加,CACC车辆依靠V2V技术可以实时获取通信距离内前方多辆CACC车辆的运动信息,从而更好地优化自身加速度^[20]。参考本团队前期的研究^[18],基于LCM提出适用于CACC车辆的CLCM(connected LCM)如式(3)~(4)所示。

$$a_n(t + \tau_n) = A_n \left[1 - \frac{v_n(t)}{v_n^f} - e^{-\frac{s_{n-1,n}(t)}{s_{n-1,n}^*(t)}} \right] + \sum_{j=n-m}^{j=n-1} \omega_j \left[k \frac{v_{j,n}(t)}{\Delta t} + ua_j(t) \right] \quad (3)$$

$$\omega_j = \frac{1}{s_{j,n}} \frac{1}{\sum_{j=n-m}^{j=n-1} \frac{1}{s_{j,n}}} \quad (4)$$

式中: m 是通信距离内可以与本车实现通信的CACC车辆数量,此处选择通信距离为300m; j 表示智能网联车辆的编号,从 $n-m$ 到 $n-1$; $v_{j,n}(t)$ 是在 t 时刻车辆 j 和 n 的速度差, $v_{j,n}(t) = v_j(t) - v_n(t)$, $a_j(t)$ 是车辆 j 在 t 时刻的加速度; k 和 u 分别是速度项 $v_{j,n}(t)/\Delta t$ 和加速度项 $a_j(t)$ 的敏感系数, Δt 为数据采集的时间间隔。 ω_j 是车辆 n 前方通信距离内智能网联车辆 j 对本车影响的权重系数,与前车和本车的距离有关。为了简化模型,式(3)可以变化为

$$a_n(t + \tau_n) = A_n \left[1 - \frac{v_n(t)}{v_n^f} - e^{-\frac{s_{n-1,n}(t)}{s_{n-1,n}^*(t)}} \right] + \sum_{j=n-m}^{j=n-1} \omega_j [pv_{j,n}(t) + ua_j(t)] \quad (5)$$

式中: $p, u \in [0, 1]$, ω_j 表明通信距离内车辆对本车的影响作用随着其间距的增大而减小。

2 LCM的标定和验证

2.1 数据描述

根据美国联邦公路管理局采集的NGSIM^[21]高精度车辆轨迹集校准车辆跟驰模型。数据采集频率为10Hz,包含的信息有:时间、速度、加速度、车辆ID、车道数、车辆类型和跟车间距等。从I-80高速公路收集的4:00pm-4:15pm数据中筛选跟驰对,筛选条件是:①前后车辆均为小汽车;②跟驰持续时间大于60s。分析数据前使用Savitzky-Golay滤波法^[22]减少异常噪声。最终提取了344个跟驰对标定LCM,还提取了由5辆车组成的车队(No. 2058, 2065, 2071, 2095, 2092)来探究考虑多前车信息对本车行为的影响。

2.2 两车跟驰参数标定

2.2.1 目标函数

跟驰模型参数标定的目标是得到一系列参数的取值,使得实际车辆运动轨迹和仿真车辆运动轨迹的差距最小。此处选择跟车间距作为目标函数^[23],计算误差百分比(percentage fitting error, PFE)^[24]来反映跟驰模型的拟合能力如下:

$$M_{Obj} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i^{emp} - S_i^{sim}}{S_i^{emp}} \right)^2} \quad (6)$$

$$M_{PFE} = \min(M_{Obj}) \times 100\% \quad (7)$$

式中： M_{Obj} 代表目标函数； S_i^{emp} 是车辆第*i*步的实际跟车间距； S_i^{sim} 是车辆仿真第*i*步的跟车间距；*N*指的是总步长，即观察的数据总个数。

2.2.2 优化算法

LCM参数标定过程是通过遗传算法实现的，需要标定的参数有6个，如表1所示。在遗传算法中，输入为跟驰对中的前车轨迹信息，包括速度、位置等信息，通过LCM模型(式(1)~(2))的计算得到仿真的后车加速度信息，这个过程的目标函数如式(6)~(7)所示。

遗传算法中种群规模设置为100；最大遗传代数设为100；收敛容许误差设为 10^{-6} ；停止代数设为100。由于算法求解的随机性，为了尽量遍寻更多的解以寻求最优解，每组跟驰行为的标定过程重复5次，取误差值最小的一组结果为最优结果。

表1 参数取值范围及其标定结果

Tab. 1 Range of parameter values and calibration results

参数	参数描述	取值范围	平均数	中位数	标准差
		[Min, Max]			
<i>b</i>	车辆 <i>i</i> 的最大减速度/($m \cdot s^{-2}$)	[2, 8]	5.15	5.90	1.41
<i>B</i>	车辆 <i>i</i> 估计前车的最大减速度/($m \cdot s^{-2}$)	[2, 8]	4.82	4.15	1.28
<i>A</i>	车辆 <i>i</i> 的最大加速度/($m \cdot s^{-2}$)	[2, 6]	4.38	4.11	1.56
τ	车辆 <i>i</i> 驾驶人反应时间/s	[0.5, 2.5]	1.00	0.90	0.50
v^0	期望速度/($m \cdot s^{-1}$)	[10, 25]	15.98	16.66	3.97
<i>l</i>	车辆的有效长度/s	[0, 10]	7.00	6.83	2.23

校准数据集的PFE值统计结果见图2。PFE平均值为9.20%，标准偏差为4.25%。大多数PFE低于20%，这对于实地采集的数据而言是可以接受的^[24-26]。此外，为了直观地说明LCM的能力，使用验证集数据对结果进行评价。以跟驰对2849~2854为例，2854车辆的仿真和实际数据如图3所示，可以看出LCM可以很好地描述车辆跟驰行为。

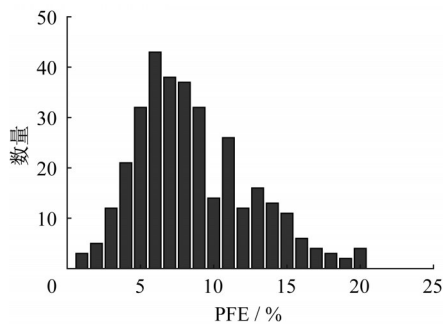


图2 校准数据集的PFE值分布

Fig. 2 Distribution of PFE in calibrated datasets

2.2.3 参数标定结果

从筛选的344个跟驰对中随机选择334个作为校准数据集，另外10个作为验证集。以校准数据集的一对跟驰行为为例，最优解的目标函数值迭代过程如图1所示。

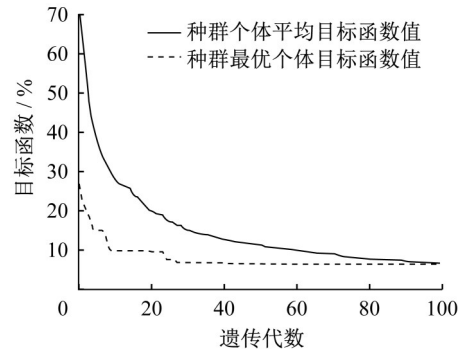


图1 目标函数值迭代过程

Fig. 1 Iterative process of objective function value

模型标定得到每个跟驰对最优参数的平均值、中位数和标准差如表2所示。

2.3 多车跟驰参数标定

受限于NGSIM数据集中研究路段长度，从NGSIM数据集中筛选出一个5辆车组成的多车(No. 2058, 2065, 2071, 2095, 2092)跟驰，使用编号1-5分别代表5辆车。

利用遗传算法根据多车跟驰的轨迹数据对CLCM进行参数标定，标定的参数包括LCM中包含的6个参数以及CLCM中新增加的参数*p*和*u*。两车跟驰和多车跟驰行为的标定过程如图4所示。图4a显示的是两车跟驰行为标定过程，仿真的输入为每个跟驰对的前车轨迹，输出是仿真得到的后车轨迹。图4b显示的是对多车跟驰行为的标定过程，仿真的输入除了包括紧邻前车的轨迹信息外，还有前方多辆车的运动信息。例如，对第3辆车的标定过程的输入除了紧邻前车第2辆车外，还有第1辆车的相关信息，具体包括第1辆车与第3辆车的速度差和第1辆车的加速度等信息，依此类推。

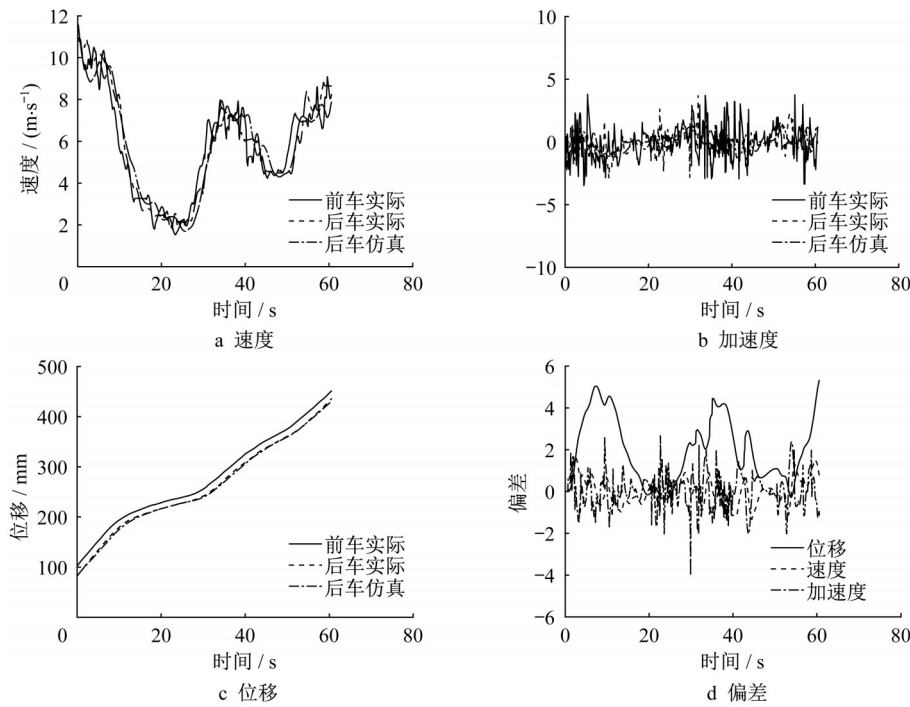


图 3 车辆 2854 跟驰表现

Fig. 3 Car-following performance of vehicle No.2854

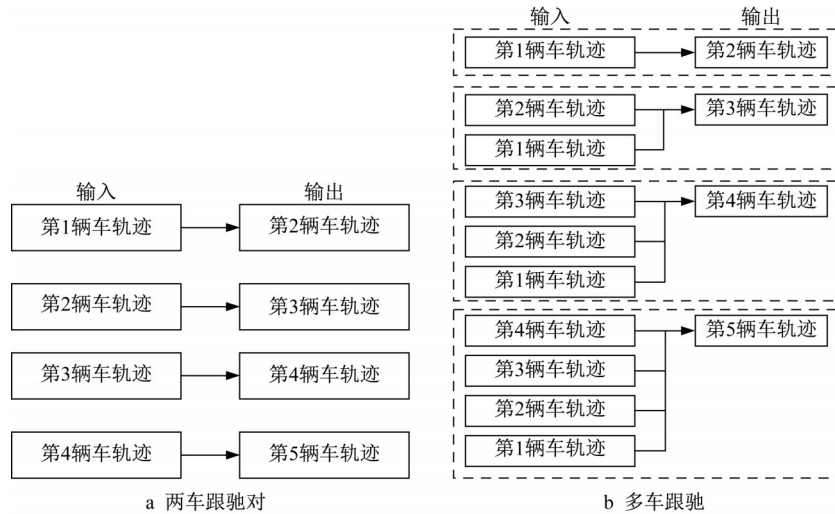


图 4 两车跟驰和多车跟驰标定过程比较

Fig. 4 Comparison between two-vehicle and platoon car-following calibration process

对两车跟驰的各模型参数标定结果如表 1 所示。考虑多前车对本车的影响,重新利用 CLCM 对参数值进行标定,新引入的参数取值结果为表 3

所示。对车队的跟驰行为仿真的结果如图 5b 所示,相比于两车跟驰的标定结果(图 5a),误差会减小。

表 2 多车跟驰的参数标定结果

Tab. 2 Calibration results of the platoon car-following behavior

参数	参数描述	第 2 辆车	第 3 辆车	第 4 辆车	第 5 辆车
b	车辆 i 的最大减速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	5.30	4.09	5.96	5.25
B	车辆 i 估计前车的最大减速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	3.10	2.00	3.17	2.90
A	车辆 i 的最大加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	2.69	2.52	4.43	4.69
τ	车辆 i 驾驶人反应时间/s	1.36	1.30	0.69	1.10
v^0	期望速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10.42	13.21	12.82	12.46
l	车辆的有效长度/s	6.95	8.95	9.27	7.08

表3 多前车影响参数标定结果

Tab. 3 Calibration results of influence parameters of multi-preceding vehicles

车辆编号	考虑信息影响的多前车车辆编号	最优参数取值
3	1	$p = 0.40; u = 0.22$
4	2	$p = 0.20; u = 0.41$
	1、2	$p = 0.32; u = 0.43$
5	3	$p = 0.52; u = 0.61$
	2、3	$p = 0.38; u = 0.51$
	1、2、3	$p = 0.43; u = 0.40$

根据式(6)计算得到两车跟驰和车队跟驰的仿真误差结果见表4,两车跟驰的误差在6.6%到11.3%之间,低于已有研究中的误差范围^[27-28]。除了紧邻前车

对本车造成直接影响外,前方车辆也会对本车造成较大影响,且影响程度随着与本车距离的增加而减小。

表4 车辆轨迹误差验证

Tab. 4 Validation error of vehicle trajectory

车辆编号	两车跟驰的误差/%	考虑信息影响的多前车车辆编号/%	多车跟驰的误差/%
2	8.6	无	8.6
3	11.3	1	9.5
4	6.6	2	5.4
		1、2	6.4
		3	5.1
5	6.6	2、3	6.2
		1、2、3	6.5

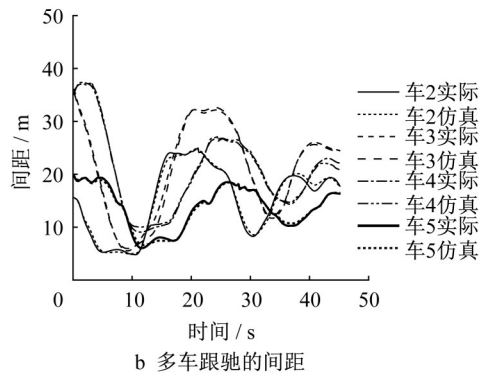
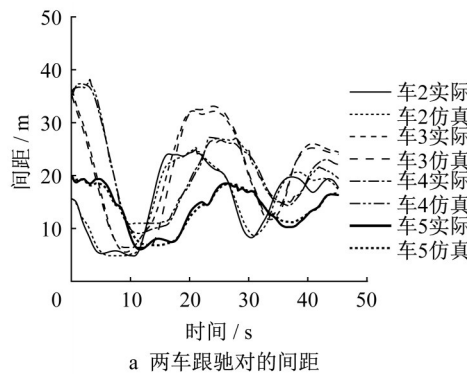


图5 车辆实际和仿真轨迹信息

Fig. 5 Empirical and simulated trajectory of the vehicles

3 模型参数取值的交通影响

车辆的驾驶行为在提升道路交通安全水平和效率水平方面有重大潜能。为了最大程度地优化道路交通并提升交通安全和效率水平,接下来探究多前车信息影响的跟驰模型CLCM中新参数的取值如何影响交通安全和效率。

3.1 评价方法

3.1.1 安全影响

选择基于碰撞时间(time to collision, TTC)指标的两个宏观指标 TET (time exposed time to collision)和 TIT (time integrated time to collision)分析仿真实验中车辆发生追尾事故风险^[29]。计算方法如下:

$$d_n(t) = \frac{x_{n-1}(t) - x_n(t) - l_{n-1}}{v_n(t) - v_{n-1}(t)} \quad (8)$$

$$\forall v_n(t) > v_{n-1}(t)$$

$$D_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T \delta_n(t) t_0$$

$$\delta_n(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq d_n(t) \leq d_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$D_2 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T [d_0 - d_n(t)] t_0, 0 \leq d_n(t) \leq d_0 \quad (10)$$

式中: l_{n-1} 是车辆 $n-1$ 的长度; $d_n(t)$ 是车辆与前车的TTC值; D_1 和 D_2 分别为TET和TIT的计算结果; d_0 是TTC的安全阈值。TET和TIT值越小表示越安全。在此处 d_0 选择为10s,这个取值比其常见阈值取值大,这是由于此处使用数据中没有极危险的场景,使用这个阈值是想探究由其变化趋势反映出来的安全水平的变化。

3.1.2 效率影响

选择交通流量作为效率的评价指标。流量是根据交通流的平均密度和平均速度计算的,如式(11)所示:

$$Q = kv \quad (11)$$

式中: Q 表示交通流量; k 表示平均密度; v 表示车队的平均速度。

3.2 参数取值的敏感性分析

CLCM中新参数 p 和 u 不同取值对交通流的稳定性有提升作用^[18],此处探究其对交通安全和效率的影

响结果。当速度差项系数 p 和加速度项系数 u 在 0 和 1 之间取不同值时,比较其对交通安全和效率影响见图 6。可以看出,随着 p 和 u 的增加,安全水平和交通效率

提高。参数 p 和 u 都有助于提高安全水平和交通效率。交通安全达到最优时参数取值为: $p=0.9$ 和 $u=1$,交通效率达到最优时参数取值为: $p=1$ 和 $u=0.4$ 。

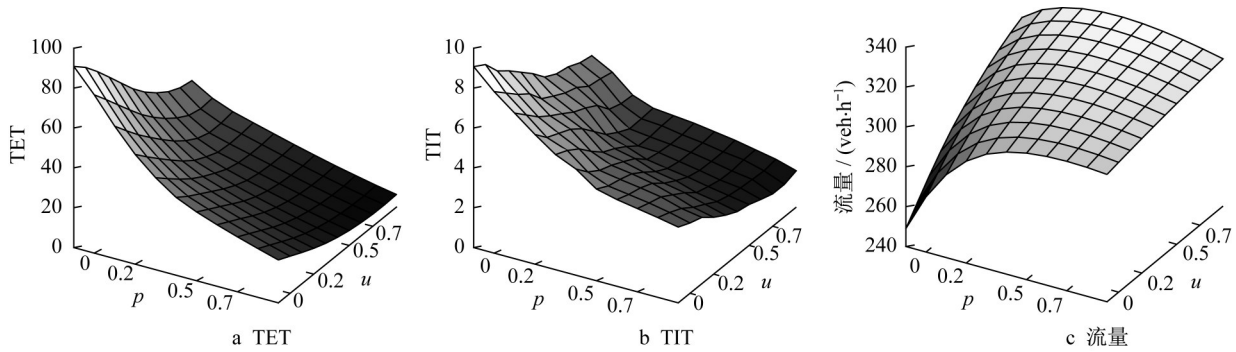


图 6 不同值 p 和 u 组合下的交通影响

Fig. 6 Traffic impact with different values of p and u

为了确定参数系数的最佳取值,目标函数如下:

$$M_{Obj} = \sum_{i=1}^3 \omega_i F_i \quad (12)$$

式中: ω_i 代表不同项 i (安全、效率)权重系数。 F_i 是相应项的标准化值。在每项中, F_i 也是通过计算加权和求得的。

$$M_{Obj_{安全}} = \omega_{TET} F_{TET} + \omega_{TIT} F_{TIT} \quad (13)$$

式中: $\omega_{TET} = \omega_{TIT} = 1/2$ 。

权重取不同值时的结果如图 7 所示,当 $\omega_{安全} = \omega_{效率} = 1/2$ 时最优的 p 和 u 的取值分别为 1 和 0.8。

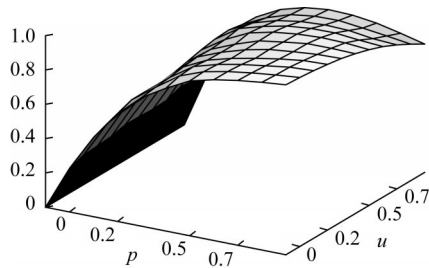


图 7 不同参数取值结果

Fig. 7 Results with different parameters values

4 混合交通流的交通影响

随着未来智能网联环境的实现,车辆会更方便

地获取前方多辆车的轨迹信息。在本团队前期的研究^[18]中探究了由可获取前方多车信息的CACC车辆和人工驾驶车辆组成的混合交通流在起步和停车的过程中对交通安全的影响。本文在此基础上利用MATLAB仿真进一步探究CACC车辆渗透率和排列方式对混合交通流的安全和效率带来的影响。

4.1 仿真场景

根据前述模型的标定结果,人工驾驶车辆反应时间 $\tau_H=1.0s$,人工驾驶车辆除了紧邻前车外,再考虑前方一辆车的影响。在此基础上,CACC车辆的反应时间为 $\tau_C=0.2s$ ^[30]。其他参数取值和HV一样。当CACC车辆跟随在CACC车辆后时,可以发挥其CACC的作用;当CACC跟随HV后时,无法获得HV的信息,CACC退化成ACC,ACC车辆的反应时间 $\tau_A=0.6s$ ^[2,31]。

仿真场景如图 8 所示。假设在不同CACC车辆渗透率下的 100 辆车以 $120km \cdot h^{-1}$ 的速度行驶,车间距由跟驰模型决定,达到稳定行驶状态后,车辆驶入限速区再离开限速区,经过减速和加速的过程。如图 8 所示,减速区位于位置 1 和位置 2 之间,长度为 600 m,经过限速区,交通流速度从 $120 km \cdot h^{-1}$ 减为 $100 km \cdot h^{-1}$ 。类似地,加速区位于位置 3 和位置 4 之间,长度为 600 m,经过加速区,交通流速度从 $100 km \cdot h^{-1}$ 增加为 $120 km \cdot h^{-1}$ 。

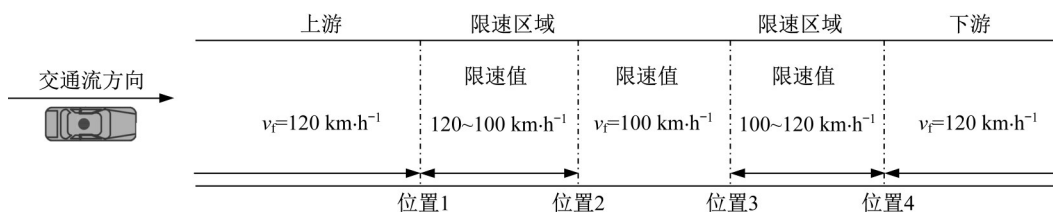


图 8 仿真场景

Fig. 8 Traffic simulation scenario

4.2 安全指标仿真结果

仿真结果如图9所示,随着CACC车辆渗透率的提升,TET/TIT随之减小;对TET/TIT而言,当渗透率小于40%时,可能会出现TET/TIT反而增加的情况,但随着渗透率继续提升,TET/TIT整体趋势不断减小。CACC车辆数量、车队数量与安全指标TET的关系如图10所示。图10a可以看出,CACC车辆数量越多,TET越小,安全水平越高;图10b可以看出车队数量和TET的关系呈现出两种截然相反的关系,其原因可能是一个车队的CACC变化范围过大。将车队长度限定为小于6辆车后,车队数量与TET的关系表现为车队数量越多,TET越小,安全水平越高。

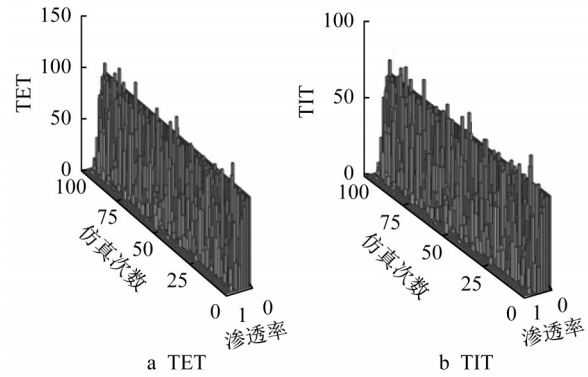


图9 $d_0=10s$ 时TET和TIT分布情况
Fig. 9 Distribution of TET and TIT with $d_0=10s$

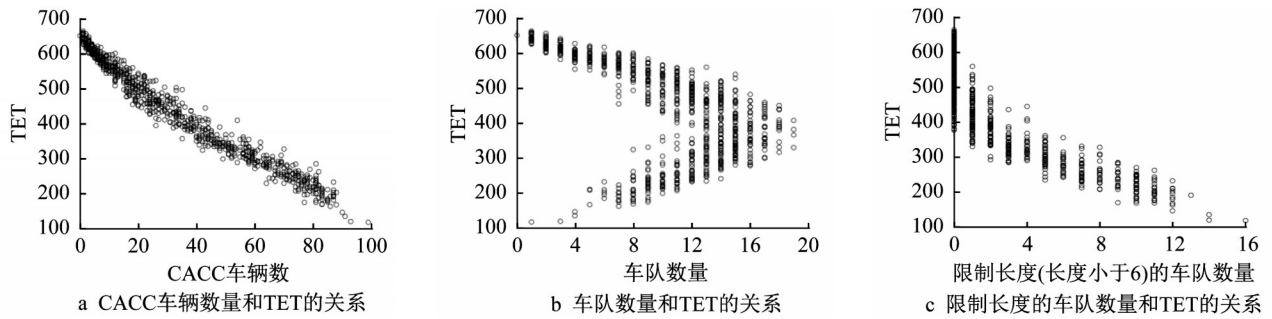


图10 CACC车辆数量、车队数量与TET的关系

Fig. 10 Relationship between the number of CACCs, the number of platoons and TET

4.3 效率指标仿真结果

选择总延误作为评估指标,即某路段上所有车辆延误的总和。延误是指所有车辆的实际行驶时间和预期行驶时间之间的差异,即

$$D = \sum_{i=1}^n (T_i - T_i^{\text{desired}}) \quad (14)$$

$$T_i = \frac{L_0}{v_i} \quad (15)$$

$$T_i^{\text{desired}} = \frac{L_0}{v_i^{\text{desired}}} \quad (16)$$

式中: D 表示总延误; n 指的是车辆总数; T_i 指的是车辆 i 的行程时间; T_i^{desired} 表明车辆 i 的期望行程时间; L_0 代表路段长度; v_i 代表车辆 i 的平均速度。

从图11中可以看出,总延迟随着CACC渗透率的增加而减少。但同一渗透率下总延误的差别很大,这意味着渗透率不是影响交通效率的唯一因素,下文将讨论CACC车辆和HV的排列方式是否影响仿真结果。以50%的渗透率为例,即50辆CACC和50辆HV组成的车队。假设以下几种情况:

(1)50辆CACC紧密相连组成一个车队,当车队的位置从第1、26或51辆车开始时,见图12a~图12c,总延误分别为4662.3s、7632.8s和11196.7s。车队位置越靠前,总延误就越少。这是因为前边HV限制了后边CACC车队运动。

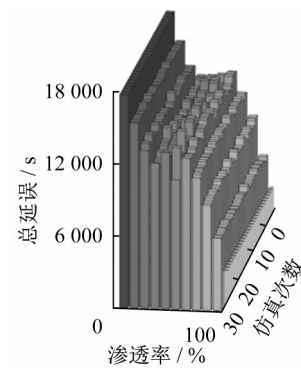


图11 总延误分布

Fig. 11 Distribution of total delay

(2)当CACC和HV交替分布时,延迟为7626.78s(见图12d)。

由于CACC车辆跟随HV时,无法通过车车通信获取HV的信息导致CACC车辆无法发挥CACC的优势,退化为ACC车辆,即通过车载检测设备获取前车运动信息。所以,CACC车辆可能发挥CACC的功能,也可能只发挥ACC的功能。本文探讨了在渗透率为50%的情况下,总延误与实际发挥CACC功能的车辆数量之间的关系,结果如图13所示。可以看出,当有更多的CACC车辆发挥实际CACC功能时,总延误的

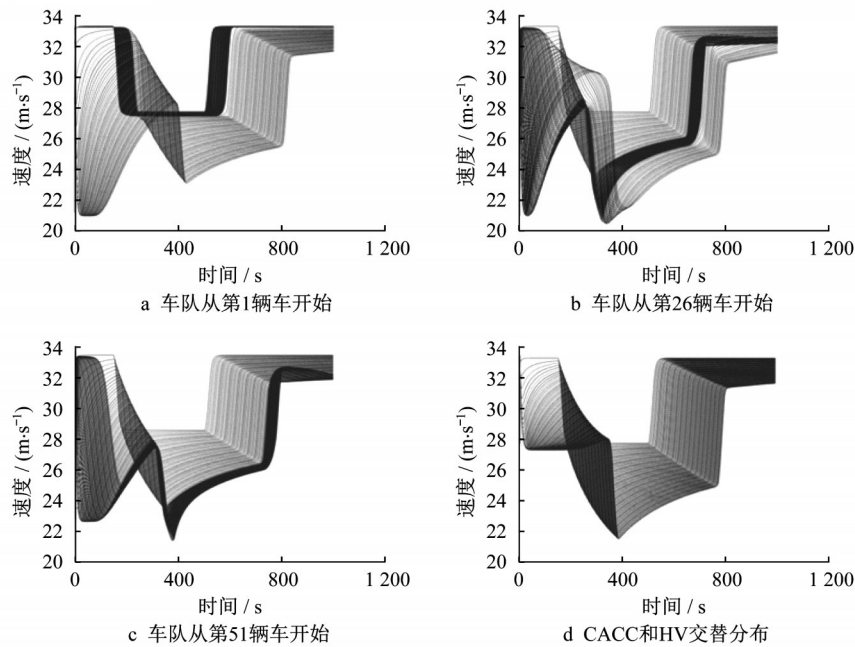


图 12 100 辆车不同位置分布的总延误(渗透率=50%)

Fig. 12 Total delay of 100 vehicles with different distributions (penetration rate=50%)

波动范围更大。这是因为它们所处的位置有多种可能。这反映出车辆的排列方式和总延误密切相关,当CACC车辆和HV混行时,HV会在很大程度上影响交通效率,因此很有必要设置CACC专用车道。

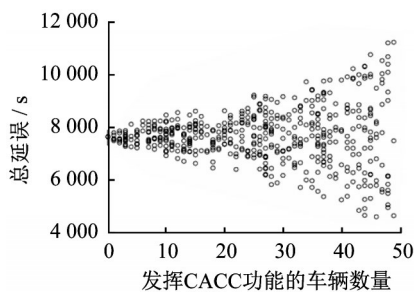


图 13 总延误和发挥 CACC 功能车辆的关系(渗透率为 50%)

Fig. 13 Relationship between total delay and actual CACC number (50% penetration rate)

5 结论

车辆的运行受到不止一辆紧邻前车的影响,可能还受到多前车的影响,因此,本文提出了一个考虑多辆前方车辆的加速度和速度差影响的车辆跟驰模型,然后利用车队的轨迹数据对模型参数进行标定。之后,当考虑车队带来的交通影响时,对模型的新参数 p 和 u 的取值进行了敏感性分析。最后,考虑到在智能网联环境下必然会出现CACC车辆与HV形成的混合交通流的场景,因此,本文还探讨了CACC渗透率对混合交通流安全和效率的影响。随着渗透率

的提升,交通安全和交通效率均有提升。车队的分布和排列方式对混合交通的安全和效率有巨大影响,很有必要设置CACC专用车道。

总之,本文所提出的模型是基于人工驾驶车辆受到多前车影响提出的,未来在智能网联环境下适用于CACC车辆的跟驰行为。然而,由于缺乏实地采集数据,所以论文只选择NGSIM数据集对人工驾驶车辆进行了研究来呈现说明性和解释性结果。但针对CACC车辆的准确建模需要实地采集的数据,未来将通过CACC车辆收集实地数据,或者利用更多车队的实验数据对本文结论进行补充和改进。

作者贡献声明:

王文璇:参与数据的搜集、建模分析,文稿撰写;

阎莹:参与研究的构思、设计,文稿修订;

吴兵:参与研究的构思、设计,对重要学术性内容做出关键性修订。

参考文献:

- [1] GUERIAU M, BILLOT R, EL F NE, *et al.* How to assess the benefits of connected vehicles? A simulation framework for the design of cooperative traffic management strategies [J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2016, 67:266.
- [2] SHLADOVER S E, SU D Y, LU X Y. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2012, 2324:63.

- [3] LIU Lin, LI Chunyuan, LI Yongfu, *et al.* Car-following behavior of connected vehicles in a mixed traffic flow: modeling and stability analysis[C]// 2018 IEEE 8th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (IEEE-CYBER).[S.l.] :IEEE, 2018:1085-1088.
- [4] PEREZ J, MILANES V, GODOY J, *et al.* Cooperative controllers for highways based on human experience[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40 (4): 1024.
- [5] SHLADOVER S E, NOWAKOWSKI C, LU X Y, *et al.* Cooperative adaptive cruise control: definitions and operating concepts [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2489: 145.
- [6] MILANES V, SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2014, 48: 285.
- [7] TALEBPOUR A, MAHMASANI H S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 71: 143.
- [8] LI Zhipeng, LI Wenzhong, XU Shangzhi, *et al.* Stability analysis of an extended intelligent driver model and its simulations under open boundary condition[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2015, 419: 526.
- [9] LI Yongfu, SUN Dihua, LIU Weining, *et al.* Modeling and simulation for microscopic traffic flow based on multiple headway, velocity and acceleration difference [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2011, 66 (1/2): 15.
- [10] NGODUY D. Linear stability of a generalized multi-anticipative car following model with time delays [J]. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2015, 22 (1/3): 420.
- [11] YU Shaowei, SHI Zhongke. The effects of vehicular gap changes with memory on traffic flow in cooperative adaptive cruise control strategy[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 428: 206.
- [12] GE J L, OROSZ G. Optimal control of connected vehicle systems with communication delay and driver reaction time [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18 (8): 2056.
- [13] NI D H, LEONARD J D, JIA C Q, *et al.* Vehicle longitudinal control and traffic stream modeling[J]. *Transportation Science*, 2016, 50(3): 1016.
- [14] ZHENG Liang, HE Zhengbing, HE Tian. A flexible traffic stream model and its three representations of traffic flow [J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2017, 75: 136.
- [15] VANDER LAAN Z, SCHONFELD P. Modeling heterogeneous traffic with cooperative adaptive cruise control vehicles: A first-order macroscopic perspective[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2020, 43: 113.
- [16] LI Linbo, LI Yang, NI Daiheng. Incorporating human factors into lcm using fuzzy TCI model[J]. *Transportmetrica B*, 2021, 9 (1): 198.
- [17] NI Daiheng. Limitations of current traffic models and strategies to address them [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2020, 104: 102.
- [18] 吴兵, 王文璇, 李林波, 等. 多前车影响的智能网联车辆纵向控制模型[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20 (2): 11.
WU Bing, WANG Wenxuan, LI linbo, *et al.* Longitudinal control model for connected autonomous vehicles influenced by multiple preceding vehicles [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20 (2): 1.
- [19] PENG G H, SUN D H. A dynamical model of car-following with the consideration of the multiple information of preceding cars[J]. *Physics Letters A*, 2010, 374 (15/16): 1694.
- [20] GE H X, DAI S Q, DONG L Y. An extended car-following model based on intelligent transportation system application[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2006, 365 (2): 543.
- [21] Transportation Department of US. NGSIM—next generation simulation[EB/OL].[2022-11-01] <https://www.fhwa.dot.gov>
- [22] BALLOULI, RIM El .NGSIM US-101 smoothed dataset [EB/OL]. [2022-11-01] https://www.researchgate.net/post/NGSIM_US-101_Dataset_Smoothing.
- [23] ZHU Meixin, WANG Xuesong, TARKO Andrew. Modeling car-following behavior on urban expressways in Shanghai: A naturalistic driving study [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 93: 425.
- [24] SHARMA Anshuman, ZHENG Zuduo, BHASKAR Ashish. Is more always better? The impact of vehicular trajectory completeness on car-following model calibration and validation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 120: 49.
- [25] BROCKFELD E., WAGNER P. Calibration and validation of microscopic traffic flow models[M]. Berlin: Traffic and Granular Flow, 2005.
- [26] TREIBER Martin, KESTING Arne, THIEMANN C. Traffic flow dynamics: data, models and simulation[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2013
- [27] KURTC Valentina, TREIBER Martin. Calibrating the local and platoon dynamics of car-following models on the reconstructed NGSIM data[M]. Heidelberg: Springer International Publishing, 2016.
- [28] KESTING Arne, TREIBER Martin. Calibrating car-following models using trajectory data: methodological study [J]. *Transportation Research Record*, 2008, 2088 (1): 148.
- [29] MINDERHOUD M M, BOVY P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2001, 33 (1): 89.
- [30] SONG Xiulan, CHEN Li. WANG Ke, *et al.* Robust time-delay feedback control of vehicular CACC systems with uncertain dynamics[J]. *Sensors*, 2020, 20(6): 1
- [31] PATEL R, LEVIN M W, BOYLES S D. Effects of autonomous vehicle behavior on arterial and freeway networks [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2561: 9.