

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201610006

混有 CACC 车辆和 ACC 车辆的混合交通流驾驶舒适性

秦严严^{1,2}, 王 昊^{1,2}, 王 炜^{1,2}, 万 千^{3,4}

(1.城市智能交通江苏省重点实验室(东南大学), 南京 210096; 2. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 南京 210096;
3. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004; 4. 华蓝设计(集团)有限公司, 南宁 530011)

摘 要: 为了探索协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC)车辆对交通系统的潜在影响,分析了 CACC 车辆市场普及过程中存在的 CACC 车辆、自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)车辆与人工驾驶车辆混合交通流驾驶舒适性. 应用加州伯克利 PATH 实车验证的 ACC 模型和 CACC 模型进行数值仿真实验,采用国际 ISO-2631-1 标准评价混合交通流舒适性,并对 ACC 和 CACC 期望车间时距进行参数敏感性分析. 最后,从交通流稳定性的角度,对舒适性仿真结果进行了讨论. 结果表明:随着 CACC 市场率的增加,舒适性呈现先恶化、再逐渐提升的趋势. 较大的 ACC 车间时距有利于抑制舒适性的恶化程度,CACC 车辆对舒适性的提升作用不受其车间时距取值的影响. 混合交通流稳定性定性地决定了舒适性的变化趋势,人工车辆安装车车通信设备,有助于舒适性的逐渐提升.

关键词: 混合交通流; 舒适性; 稳定性; 跟驰模型; 协同自适应巡航控制; 自适应巡航控制

中图分类号: U491.112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)09-0103-06

Driving comfort of traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles and adaptive cruise control vehicles

QIN Yanyan^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, WAN Qian^{3,4}

(1.Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS (Southeast University), Nanjing 210096, China;

2.Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing 210096, China;

3.School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

4. Hualan Design and Consulting Group, Nanning 530011, China)

Abstract: In order to explore the potential impact of cooperative adaptive cruise control (CACC) vehicles on traffic systems, driving comfort is analyzed under different CACC penetrations where manual vehicles, CACC vehicles, and adaptive cruise control (ACC) vehicles are mixed in the process of CACC gradually increasing on roads. The ACC and CACC models validated by PATH program were employed in numerical simulations. Driving comfort of the mixed traffic flow was measured using the international organization for standardization(ISO) 2631-1. Parametric sensitivity analysis on the desired time-gap of ACC and CACC was also conducted. Finally, simulation results were discussed from the perspective of traffic flow stability. It is found that comfort first worsens then upgrades with the increase of CACC penetration. Larger ACC time-gap is apt to restrict the comfort deterioration, while various values of CACC time-gap have little effect on improving the driving comfort. The results indicate that the trend of mixed traffic flow stability affects comfort qualitatively. Vehicle-to-vehicle communication equipment of manual vehicles will benefit the gradual increase of the comfort.

Keywords: mixed traffic flow; driving comfort; string stability; car-following model; cooperative adaptive cruise control; adaptive cruise control

自动驾驶汽车与车联网技术的发展,使得未来交通流由人工驾驶车辆、协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC)车辆随机混合而成. 由于人工驾驶车辆缺乏车车通信设

备,紧跟人工车辆的 CACC 车辆因无法接收到前方车辆的信息而自动退化为自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)车辆^[1].

针对这种混合交通流特性的研究,国外研究开展较早,成果主要集中在通行能力^[2]、交通安全^[3]、交通污染^[4]等方面. 但针对驾驶舒适性的研究开展较少^[5],且缺乏对舒适性研究结果内在原因的分析. 此外,很多研究中应用的 ACC 模型与 CACC 模型缺乏与实车实验的对比. 相比而言,国内研究起步较晚,虽然涉及 ACC 与 CACC 控制技术的设计^[6],但

收稿日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51478113,51508122);

广西科技攻关计划项目(15248002-10);

江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX17-0146)

作者简介: 秦严严(1989—),男,博士研究生;

王 昊(1980—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王 昊,haowang@seu.edu.cn

国内鲜有文献对这种混合交通环境下的驾驶舒适性开展研究。

鉴于此,应用加州伯克利 PATH 实验室实车验证的 ACC 模型和 CACC 模型,研究不同 CACC 市场率时的驾驶舒适性. 考虑到舒适性本质上体现了车辆偏离平衡态时的加减速过程,从混合交通流稳定性的角度阐述舒适性仿真结果的内在原因。

为了不引起混淆,本文 CACC 市场率是指 CACC 车辆没有退化为 ACC 车辆之前所占的交通流总车辆数的比例. CACC 市场率记为 p ,人工驾驶车辆比例为 $1-p$,ACC 车辆比例由退化前的 CACC 车辆与人工驾驶车辆相对位置随机产生。

1 跟驰模型

1.1 人工驾驶车辆

IDM (intelligent driver model) 跟驰模型^[7]被广泛应用于人工车辆的仿真研究,其模型为

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}}{s} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

式中: a 为最大加速度, v_0 为自由流速度, s_0 为最小停车间距, T 为安全车头时距, b 为舒适减速度, Δv 为相邻车辆的速度差项. 依据文献[8-9], a 取值为 1.0 m/s^2 , v_0 取值为 33.3 m/s , s_0 取值为 2.0 m , T 取值为 1.5 s , b 取值为 2.0 m/s^2 .

1.2 ACC 车辆

应用文献[9]通过实车实验标定的 ACC 模型,该模型可较好反应目前商用 ACC 控制系统应用于真实车辆的跟驰特性. 由于该 ACC 控制系统并不具有驾驶员驾驶行为差异性,因此可应用于我国交通流特性的研究. 模型为

$$\dot{v} = k_1(h - l - s_0 - T_A v) + k_2 \Delta v. \quad (2)$$

式中: h 为车头间距, l 为车长, s_0 为最小停车间距, T_A 为 ACC 期望车间时距, k_1 和 k_2 为控制系数,依据文献[9], k_1 取值为 0.23 , k_2 取值为 0.07 . 依据文献[10], T_A 取值为 1.1 、 1.6 、 2.2 s 时的接受比率分别为 50.4% 、 18.5% 、 31.1% .

1.3 CACC 车辆

PATH 依据 CACC 上层控制器设计^[11],提出了基于速度控制的 CACC 模型,并通过实车实验验证了该 CACC 模型能够用于真实 CACC 车辆的仿真研究^[9]. 由于 CACC 车辆跟驰特性并不取决于驾驶员差异性,因此该 CACC 模型同样可适用于我国交通流特性研究. 模型为

$$\begin{cases} \dot{v} = v_p + k_p e + k_d \dot{e}, \\ \dot{e} = h - s_0 - l - T_C v. \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_p 为前一控制时刻的速度, e 为实际车间距与期望车间距的误差, h 、 l 、 s_0 含义同式(2), T_C 为 CACC 期望车间时距, k_p 、 k_d 为控制系数. 实车实验对 k_p 和 k_d 的标定结果为: $k_p = 0.45$, $k_d = 0.25$. 依据文献[10], T_C 取值为 0.6 、 0.7 、 0.9 、 1.1 s 时的接受比率分别为 57.0% 、 24.0% 、 7.0% 、 12.0% .

2 评价指标

应用基于国际 ISO 2631-1 标准的驾驶舒适性指标^[12],评价不同 CACC 市场率时的舒适性. 文献[12]对国际 ISO 2631-1 舒适性指标进行了较详细阐述,舒适性指标为

$$C = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=0}^m a_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

式中: a_i 为统计获取的第 i 个加速度值, m 为加速度统计总量. 文献[12]将舒适性分为 6 个等级,如表 1 所示.

表 1 舒适性等级
Tab.1 Comfort index level

等级	$C / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	舒适性描述
0	>2	极端不舒适
1	$1.25 \sim 2.5$	非常不舒适
2	$0.8 \sim 1.6$	不舒适
3	$0.5 \sim 1$	较不舒适
4	$0.315 \sim 0.63$	轻微不舒适
5	<0.315	舒适

3 仿真实验与分析

舒适性指标反应的是车辆加速度情况,而匝道合流区是扰动常发区域,加速度变化较为频繁,因此针对含有匝道的高速公路交通场景,基于数值仿真实验评估舒适性具有较好代表性,数值仿真实验基于 MATLAB 仿真软件.

3.1 实验结果

T_A 、 T_C 的最大接受比例取值分别为 1.1 、 0.6 s ^[10],以 $T_A = 1.1 \text{ s}$, $T_C = 0.6 \text{ s}$ 为例,基于数值仿真实验研究混合交通流舒适性. 并在 3.2 节对 T_A 和 T_C 进行参数敏感性分析.

数值仿真实验路段如图 1 所示,路段长度为 6 km ,匝道位于 3 km 位置处,匝道区为 500 m ,由于本文关注匝道汇入行为对主路车流造成的影响,依据文献[13]中的模拟机制,仿真中对主路车流在匝道区进行随机减速,且减速范围参照文献[14]. 在匝道区及其上下游 800 m 内布设虚拟检测器,检测器间隔为 50 m . 在仿真实验中,CACC 市场率 p 随机地确定驶入车辆为 CACC 车辆或者人工驾驶车辆.

若该驶入车辆为 CACC 车辆,在其紧跟人工车辆时,需退化为 ACC 车辆. 考虑仿真实验中 3 种车型相对数量、位置的随机性,各 CACC 市场率下均独立进行 3 次仿真,并取均值作为该 CACC 市场率下的舒适性仿真结果,当 CACC 市场率 p 等于 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 时, C 指标均值分别为 0.499、0.502、0.514、0.517、0.525、0.537、0.677、0.705、0.637、0.414、0.277. 因此,随着 CACC 市场率 p 的增加,舒适性 C 指标呈现出先变大再减小的变化趋势,表明舒适性逐渐变差,然后再逐步恢复并得到提高. 对照表 1 中 C 取值范围与舒适性等级之间的关系,将 C 值仿真结果转换为舒适性等级的变化趋势,如图 2 所示. 由图 2 可知,随着 p 的增加,舒适性由等级 4 逐步恶化至等级 3,尔后再恢复并提升至等级 5,当 p 大于 80% 时,舒适性的提升较为显著.

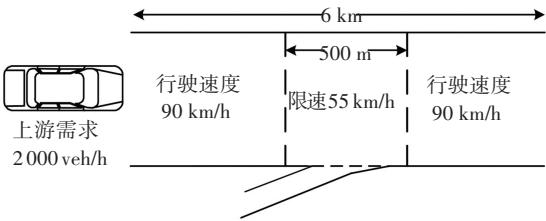


图 1 仿真路段示意图
Fig.1 Road section in simulations

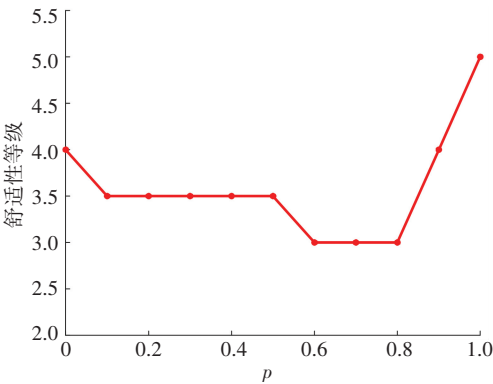


图 2 舒适性等级结果 ($T_A=1.1\text{ s}, T_C=0.6\text{ s}$)
Fig.2 Results of comfort level ($T_A = 1.1\text{ s}, T_C = 0.6\text{ s}$)

3.2 参数敏感性分析

3.2.1 T_C 参数敏感性分析

在对 T_C 进行参数敏感性分析时, T_A 取接受比率最大时的 1.1 s. 考虑到随机性影响,每次仿真实验均进行 3 次,结果如表 2 所示. 为了直观地看出 T_C 取值对舒适性的影响,计算得到舒适性 C 指标值随 CACC 市场率 p 变化的趋势,如图 3 所示. 同时,按照表 1 中 C 指标值对应的舒适性等级,得到不同 T_C 、 p 取值时的舒适性等级热力图,如图 4 所示. 在图 4 中,各 T_C 与 p 对应的小方格颜色值为舒适性等级数值,且该颜色值能够反映两个舒适性等级之间的情况.

表 2 T_C 参数敏感性分析结果 ($T_A=1.1\text{ s}$)			
Tab.2 Results of sensitivity analysis on T_C ($T_A = 1.1\text{ s}$)			
p	不同 T_C 时的均值 $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$		
	0.7 s	0.9 s	1.1 s
0	0.499	0.499	0.499
0.1	0.500	0.500	0.502
0.2	0.509	0.516	0.517
0.3	0.513	0.520	0.522
0.4	0.523	0.531	0.531
0.5	0.535	0.539	0.535
0.6	0.645	0.656	0.663
0.7	0.719	0.699	0.707
0.8	0.626	0.629	0.632
0.9	0.384	0.365	0.356
1	0.266	0.242	0.221

由图 3 可知,随着 p 增加, C 指标值先变大再减小的变化趋势与 T_C 取值无关. 且同一 p 值下,不同 T_C 取值时的 C 指标值基本相当. 表明了舒适性指标 C 值的大小不依赖于 T_C 取值的大小. 由图 4 可知,随着 p 的增加,舒适性等级变化趋势与 T_C 取值无关,均由等级 4 恶化至等级 3,然后再恢复并提升至等级 5,且在 p 大于 80% 时,舒适性的提升较为明显,这与图 2 中的结果相一致.

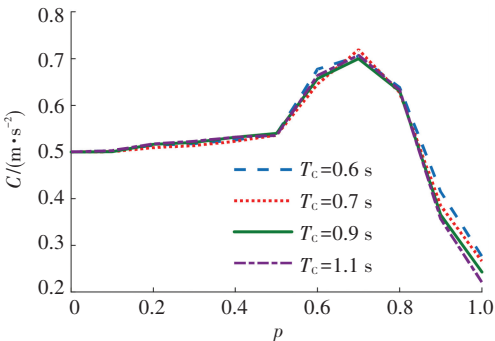


图 3 T_C 敏感性分析的 C 指标值 ($T_A=1.1\text{ s}$)
Fig.3 C of sensitivity analysis on T_C ($T_A = 1.1\text{ s}$)

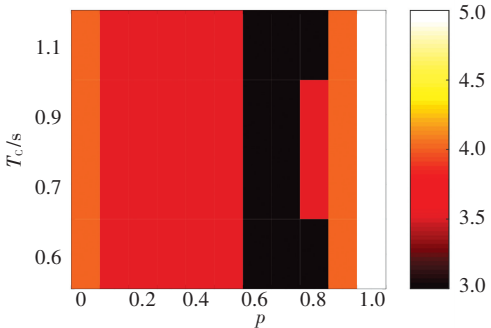


图 4 T_C 敏感性分析的舒适性等级 ($T_A=1.1\text{ s}$)
Fig.4 Comfort level of sensitivity analysis on T_C ($T_A = 1.1\text{ s}$)

3.2.2 T_A 参数敏感性分析

在对 T_A 取值进行参数敏感性分析, T_C 取接受

比率最大时的 0.6 s. T_A 参数敏感性分析结果如表 3 所示,同时计算得到 C 随 p 增加的变化趋势,如图 5 所示. 同时依据表 1 中 C 值对应的舒适性等级,得到不同 T_A 、 p 取值时的舒适性等级热力图,如图 6 所示.

表 3 T_A 参数敏感性分析结果 ($T_C=0.6$ s)

Tab.3 Results of sensitivity analysis on T_A ($T_C = 0.6$ s)

p	不同 T_A 时的均值 $C/(m \cdot s^{-2})$	
	1.6 s	2.2 s
0	0.499	0.499
0.1	0.501	0.500
0.2	0.502	0.500
0.3	0.511	0.510
0.4	0.515	0.512
0.5	0.528	0.520
0.6	0.602	0.585
0.7	0.652	0.613
0.8	0.603	0.538
0.9	0.365	0.351
1	0.277	0.277

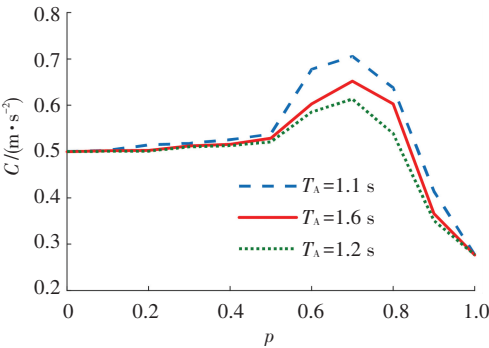


图 5 T_A 敏感性分析的 C 指标值 ($T_C=0.6$ s)
Fig.5 C of sensitivity analysis on T_A ($T_C = 0.6$ s)

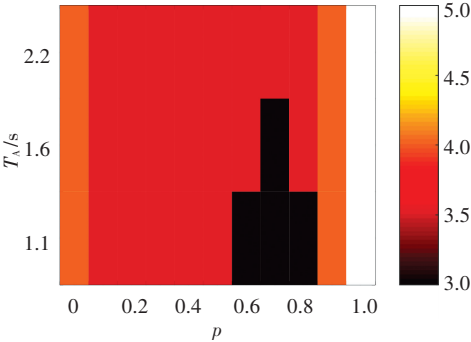


图 6 T_A 敏感性分析的舒适性等级 ($T_C=0.6$ s)
Fig.6 Comfort level of sensitivity analysis on T_A ($T_C = 0.6$ s)

由图 5、6 可知,不同 T_A 取值时, C 指标值随着 p 的增加,均呈现出先增大后减小的变化过程,同时舒适性等级呈现出先降低后增加的变化趋势. 表明在 p 逐步普及的过程中,舒适性会逐步恶化,然后恢复并得到提升,这与 3.1 节中的仿真结果相一致. 此外,在同一 p 取值下, T_A 取值增大时, C 指标值明显减小,且舒适性等级明显增加. 表明在 p 逐渐增加时, T_A 取值越大,越有利于抑制舒适性的恶化程度,

但舒适性在 p 达到 80% 以后,才能够得到显著提升.

4 讨 论

舒适性本质上体现了交通流由平衡态变为非平衡态时的动态加减速过程,因此,针对第 3 节舒适性随 CACC 市场率增加的变化趋势,以及 T_A 、 T_C 取值对舒适性的影响,从混合交通流稳定性的角度阐述其内在原因.

4.1 跟驰模型稳定性

分析 3 种车型跟驰模型的稳定性,为 4.2 节讨论混合交通流在不同 CACC 市场率下的稳定性作铺垫. 文献[15]推导了跟驰模型一般稳定性条件为

$$\frac{1}{2} (f^v)^2 - f^{\Delta v} f^v - f^h < 0.$$

(5)

式中: f^v 、 $f^{\Delta v}$ 、 f^h 分别为跟驰模型公式对速度、速度差和车头间距在平衡态时的偏微分. 因此,可计算人工车辆、ACC 车辆、CACC 车辆各自稳定时应满足的条件分别如式(6)、(7)、(8)所示. 其中 Δt 为依据文献[16]进行推导时,由一阶泰勒展开产生的时间步长,取值 0.01 s. 式(6)~(8)中其余参数均为对应的跟驰模型参数.

$$\begin{cases} \frac{1}{2} (f_R^v)^2 - f_R^{\Delta v} f_R^v - f_R^h < 0, \\ f_R^v = -\frac{4av^3}{v_0^4} - \frac{2aT[1 - (v/v_0)^4]}{s_0 + vT}, \\ f_R^{\Delta v} = \sqrt{\frac{a}{b}} \frac{v[1 - (v/v_0)^4]}{s_0 + vT}, \\ f_R^h = 2a \frac{[1 - (v/v_0)^4] \sqrt{1 - (v/v_0)^4}}{s_0 + vT}. \end{cases}$$

(6)

$$\begin{cases} \frac{1}{2} (f_A^v)^2 - f_A^{\Delta v} f_A^v - f_A^h < 0, \\ f_A^v = -k_1 T_A, \\ f_A^{\Delta v} = k_2, \\ f_A^h = k_1. \end{cases}$$

(7)

$$\begin{cases} \frac{1}{2} (f_C^v)^2 - f_C^{\Delta v} f_C^v - f_C^h < 0, \\ f_C^v = -\frac{k_p T_C}{\Delta t + k_d T_C}, \\ f_C^{\Delta v} = \frac{k_d}{\Delta t + k_d T_C}, \\ f_C^h = \frac{k_p}{\Delta t + k_d T_C}. \end{cases}$$

(8)

依据式(6)~(8)计算可知,人工驾驶车辆在0~0.6 m·s⁻¹和 21.4~33.3 m·s⁻¹的速度时稳定,在0.6~

$21.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时不稳定. ACC 车辆在自由流速度内均不稳定, CACC 车辆在自由流速度内均稳定.

4.2 舒适性变化趋势原因分析

在舒适性仿真实验中, 车辆的加减速过程包含了人工驾驶车辆的不稳定速度范围, 依据 PATH 实车实验^[9], 目前控制水平下的 ACC 车辆较人工驾驶车辆更加不稳定, 在 CACC 市场率较小的阶段, 由于车辆位置分布的随机性, 造成 CACC 车辆分散在人工驾驶车辆之间, 大部分退化为 ACC 车辆, 使得混合交通流稳定性出现恶化. 随着 CACC 市场率增大到较高阶段, CACC 车辆退化为 ACC 车辆的概率减小, CACC 车辆较好的稳定性使得混合交通流不稳定情况得到改善, 并最终达到稳定状态. 以 $T_A = 1.1 \text{ s}$, $T_C = 0.6 \text{ s}$ 为例, 混合交通流稳定性仿真结果如图 7 所示. 在图 7 中, 车队包含 60 辆车, 3 种车型相对数量、位置均由 CACC 市场率 p 随机产生, 且紧跟人工驾驶车辆的 CACC 车辆退化为 ACC 车辆, 车队以 17 m/s 的平衡态速度行驶, 头车产生 1 m/s^2 的减速度扰动打破车队平衡态, 头车扰动持续 3 s .

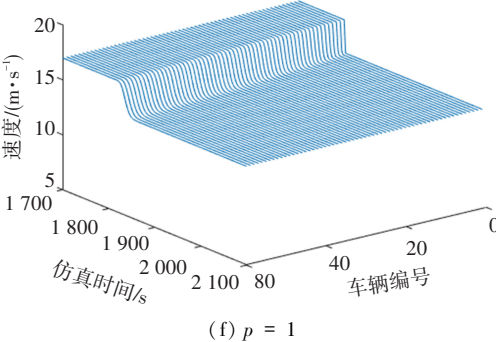
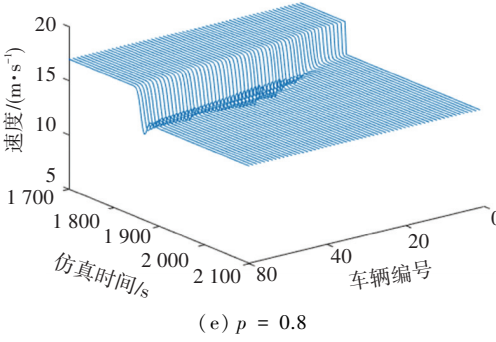
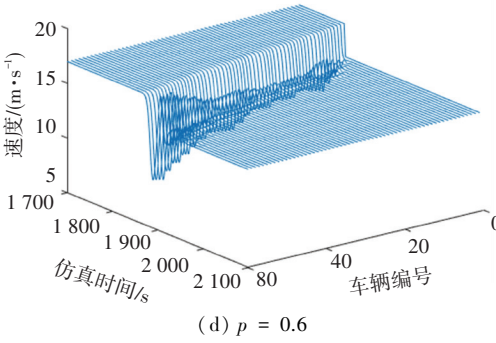
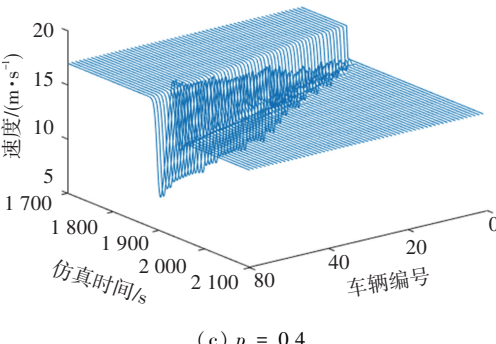
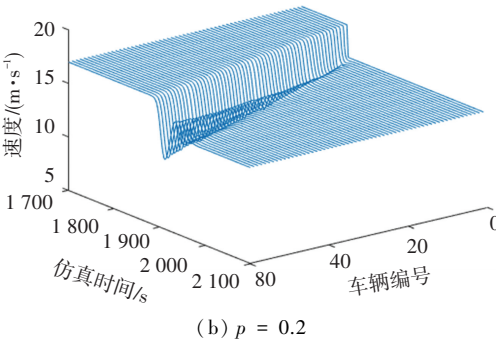
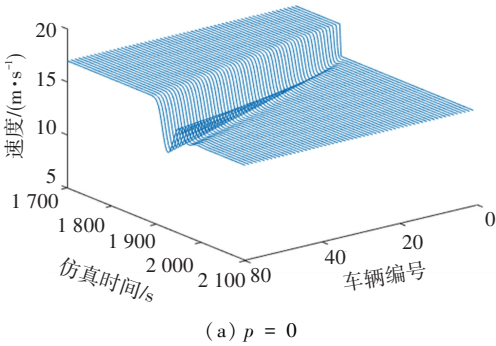


图 7 混合交通流稳定性

Fig.7 String stability of mixed traffic flow

由图 7 可以看出, 混合交通流稳定性随着 p 的增加, 呈现出先恶化、再逐步改善并达到稳定的变化趋势, 表明混合交通流稳定性的变化趋势与舒适性的变化趋势一致. 如前所述, 舒适性本质上体现了交通流背离平衡态的加减速过程. 因此, 在 p 逐步增加的过程中, 混合交通流稳定性的变化趋势定性地影响了舒适性变化趋势. 并且, 在 p 超过 80% 以后, 车队最终变为稳定状态, 使得舒适性得到明显提升. 此外, 由于 ACC 车辆不稳定性与 T_A 取值无关, 且 T_C 取不同值时, CACC 车辆均稳定, 使得混合交通流稳定性变化趋势与 T_A 和 T_C 取值无关, 这是第 3 节仿真中 T_A 和 T_C 取值并不影响舒适性变化趋势的原因.

4.3 T_A 、 T_C 对舒适程度影响的原因分析

由第 3 节可知, T_A 取值较大时, 有利于抑制舒适性的恶化程度, 而 T_C 取值不同并不影响舒适性的舒适程度. 通过分析 T_A 、 T_C 取不同值时, ACC 车辆和 CACC 车辆减速时的速度、加速度动态特性, 进行原因阐述.

假设在图 7 的仿真实验中,车队头车(前车)的紧跟车辆(后车)分别为人工驾驶车辆、ACC 车辆和 CACC 车辆时,后车在前车扰动下的速度与加速度动态变化分别如图 8、9 所示。

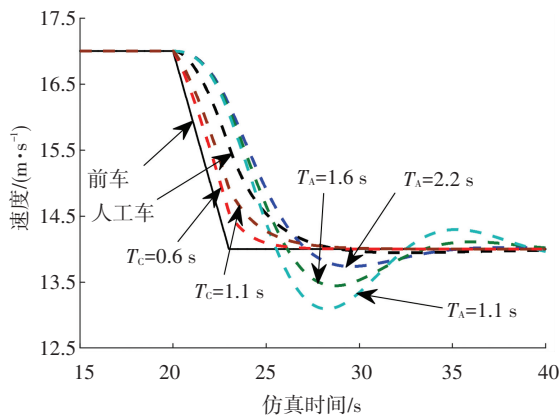


图 8 速度动态变化

Fig.8 Dynamic change of velocity

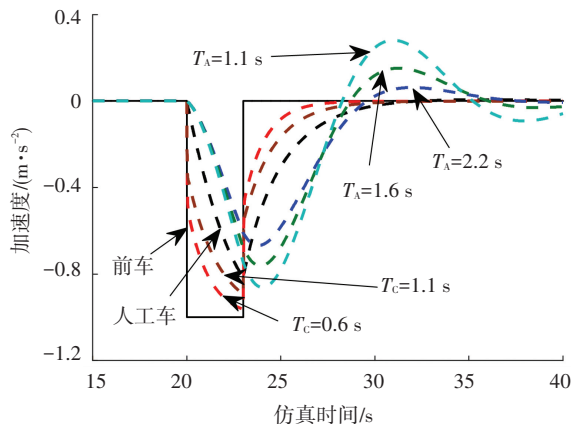


图 9 加速度动态变化

Fig.9 Dynamic change of acceleration

由图 8、9 可知, T_A 取值不同时, ACC 车辆速度、加速度动态特性均比人工驾驶车辆差, 这与 PATH 的实车实验相符合^[9], 这也是 4.2 节仿真中混合交通流稳定性存在恶化趋势的原因。 T_A 取值越大, ACC 车辆的速度和加速度动态特性有所改善, 因此有利于抑制混合交通流稳定性的恶化, 这是 T_A 取值越大, 越有利于抑制舒适性恶化程度的原因。而 T_C 取值不同时, CACC 车辆速度和加速度动态特性均稳定, 使得舒适性不受 T_C 取值的影响。

4.4 车车通信环境下的舒适性

由上面分析可知, ACC 车辆的不稳定性使得在 p 逐步普及的过程中, 舒适性存在先恶化、再逐步恢复并得到提升的趋势。若人工车辆均安装车车通信设备, 则混合交通流由人工驾驶车辆和 CACC 车辆两种车型构成。以 $T_C = 0.6$ s 为例, 假设人工驾驶车辆均安装车车通信设备, 获得舒适性等级随 p 变化的曲线如图 10 所示。对比图 10 与第 3 节的仿真结

果可知, 车车通信环境下舒适性随 p 的增加而逐步得到提升。

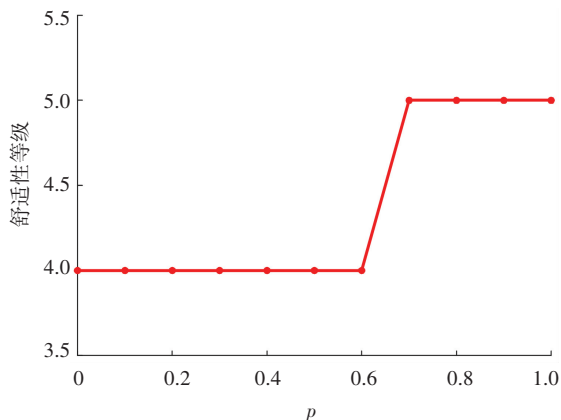


图 10 车车通信时的舒适性

Fig.10 Comfort of vehicle-to-vehicle communications

5 结 论

1) 随着 CACC 市场率的增加, 人工车辆、ACC 车辆和 CACC 车辆的混合交通流稳定性先恶化、然后逐步恢复至稳定状态。稳定性变化趋势定性决定了舒适性变化趋势, 使得混合交通流舒适性呈现出先恶化、再恢复、最后得到提升的变化趋势。

2) 车辆加减速时的速度与加速度动态特性决定了舒适性变化趋势不受 ACC、CACC 期望车间时距取值的影响。ACC 期望车间时距越大, 越有利于抑制舒适性的恶化程度。CACC 车辆有利于舒适性的提升, 但舒适性程度并不受 CACC 期望车间时距取值的影响。人工车辆安装车车通信设备时, 由人工车辆和 CACC 车辆构成的混合交通流舒适性随着 CACC 车辆的普及呈现出逐步改善的趋势。

3) 目前尚不具备大规模真车实验条件, 只能针对不同 CACC 市场率舒适性的仿真研究作为真车实验实施前的前期探索, 为未来大规模真车实验的实施提供参考。同时, 驾驶舒适性评价的最佳途径仍然是真实环境下的真车实验, 因此本文舒适性的仿真研究具有模型指标化替代手段的一般局限性。

参考文献

- [1] PLOEG J, SEMSAR-KAZEROONI E, LIJSTER G, et al. Graceful degradation of cooperative adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 488-497.
- [2] VAN AREM B, VAN DRIEL C J G, VISSER R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(4): 429-436.
- [3] DEY K C, YAN L, WANG X, et al. A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC)[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 491-509. (下转第 173 页)