

考虑网联辅助驾驶设备影响的混合交通流通行能力分析

秦严严,唐鸿辉,李淑庆,杨金滢

(重庆交通大学 交通运输学院,重庆 400074)

摘要:针对由传统人工车辆、安装网联辅助驾驶设备的人工车辆、协同自适应巡航控制(CACC)车辆以及由其跟驰人工车辆退化而来的自适应巡航控制(ACC)车辆构成的混合交通流,推导了数学解析表达,建立了混合交通流基本图模型,分析了不同网联车辆渗透率下,网联辅助驾驶设备安装率对混合交通流通行能力的影响,并对自适应巡航控制车辆期望车间时距进行参数敏感性分析。研究结果表明:当期望车间时距为2.2 s、网联车辆渗透率分别为0.1、0.2、0.3以及网联辅助驾驶设备安装率分别不低于0.4、0.3、0.2时,可有效改善混合交通流通行能力恶化现象,且当网联车辆渗透率不低于0.4、网联辅助驾驶设备安装率超过0.3时,最大通行能力提升大于5%;当期望车间时距为1.6 s、网联车辆渗透率分别取0.2、0.3、0.4、0.5,网联辅助驾驶设备安装率分别不低于0.6、0.5、0.4、0.3时,或期望车间时距为1.1 s、网联车辆渗透率分别为0.3、0.4、0.5,网联辅助驾驶设备安装率分别不低于0.8、0.6、0.5时,最大通行能力提升大于5%,此时提高网联辅助驾驶设备安装率有利于通行能力的快速提升。

关键词:通行能力;混合交通流;网联辅助驾驶设备;安装率;敏感性分析

中图分类号:U491

文献标志码:A

Capacity analysis of mixed traffic flow considering the influence of connected auxiliary driving equipment

QIN Yanyan, TANG Honghui, LI Shuqing, YANG Jinying

(School of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In view of the mixed traffic flow composed of regular vehicles, connected and regular vehicles, cooperative adaptive cruise control (CACC) vehicles, and adaptive cruise control (ACC) vehicles degraded by their following regular vehicles, an analytical expression was derived to describe its mathematical proportional relationship. Then, a basic graph model for mixed traffic flow was established to analyze the influence of the installation rate of connected auxiliary driving equipment on the traveling capacity of mixed traffic flow under different penetration rates of the connected vehicles. Finally, the parameter sensitivity analysis of the expected headway for adaptive cruise control vehicles was carried out. The results show that when expected headway is 2.2 s, the penetration rate of connected vehicles is 0.1, 0.2 and 0.3 respectively, and the installation rate of connected driving assist equipment is not less than 0.4, 0.3 and 0.2 respectively, the deterioration of mixed traffic flow capacity can be effectively improved. When the penetration rate of the connected vehicles is no less than 0.4 and the installation rate of the connected auxiliary driving equipment is more than 0.3, the improvement of maximum capacity is more than 5%. When the expected headway is 1.6 s, the penetration rate of the connected vehicles is 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and the installation rate of the connected auxiliary driving equipment is no less than 0.6, 0.5, 0.4 and 0.3, or when the expected workshop time distance is 1.1 s, the penetration rate of connected vehicles is 0.3, 0.4, 0.5, the installation rate of connected driving assist equipment is no less than 0.8, 0.6 and 0.5, the improvement of maximum capacity is higher

收稿日期:2021-09-15

基金项目:重庆市社会科学规划项目(2019B5074);重庆交通大学研究生科研创新项目(2021S0034)

作者简介:秦严严(1989—),男,江苏沛县人,副教授,博士,主要研究方向为交通流理论与应用.E-mail:qinyanyan@cqjtu.edu.cn

than 5%, indicating that increasing the installation rate of connected auxiliary equipment on this basis is conducive to the rapid improvement of traffic capacity.

Key words: capacity; mixed traffic flow; connected auxiliary driving equipment; installation rate; sensitivity analysis

随着辅助驾驶系统、车联网、自动驾驶技术的发展,未来道路上必将出现人工车辆、网联辅助驾驶车辆以及网联自动驾驶车辆组成的混合车流^[1]。网联辅助驾驶车辆和网联自动驾驶车辆可通过检测设备或 V2V(vehicle-to-vehicle)通信设备实时获取前车行驶信息,以调整自身行驶状态,对于改善交通流有积极影响。

国内外学者对此进行了相关研究,但大多均集中在 V2V 车辆的应用对混合交通流的影响,较少考虑人工车辆安装网联辅助驾驶设备后对混合交通流的影响。Knorr 等针对由人工-V2V 车辆构成的混合交通流进行了仿真分析,表明 V2V 车辆的应用能改善混合交通流的通行效率^[2-3];Talebpour 等^[4]研究了不同网联车辆比例下混合交通流的稳定性,结果表明提高网联车辆比例能改善交通流通行能力;Shladover 等^[5]研究了自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)车辆和协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC)车辆的不同市场渗透率对公路通行能力的影响,认为可通过对非 ACC 车辆配备感知装置来减少 CACC 车辆退化从而提高交通容量。秦严严等^[6]通过改进 ACC 车辆跟驰模型,提高了通行能力且不受道路限速影响。徐伟等^[7]基于 V2V 环境下驾驶员反应提前时间改进了优化速度(optimal velocity, OV)模型,极大提高了交叉口的通行效率;Xie 等^[8]分析了考虑反应时间的混合交通流线性稳定条件,认为网联车辆大量使用能提高交通流的稳定性和效率。徐桃让等^[9]研究了混合交通流不同程度智能化车辆反应时间的差异对通行能力的影响,结果表明增大网联车辆比例能提高混合交通流的通行能力;Yao 等^[10]考虑了混合交通流的稳定性和基本图模型,认为自由流速度、期望车头时距对通行能力有影响;秦严严等^[11-12]针对由人工车辆、ACC 车辆和 CACC 车辆构成的异质交通流进行了数值仿真试验,并以混合车流基本图模型为基础,提出混合交通流 Lighthill-Whitham-Richards(LWR)模型,能量化分析交通拥堵演化的传播机制,但较少考虑人工车辆装备网联辅助驾驶设备对混合交通流的影响。

综上所述,国内外学者对混有网联车辆的混合交通流通行能力进行了相关研究并取得了不少成果,但较少考虑到人工车辆安装网联辅助设备后对混合交通流的影响,以及网联辅助设备安装率等对通行能力的影响。本研究针对由传统人工车辆(regular vehicle, RV)、安装网联辅助驾驶设备的人工车辆(connected and regular vehicle, CRV)、CACC 车辆以及由 CACC 车辆跟驰 RV 退化而来的 ACC 车辆构成的混合交通流,建立 4 种车辆的数学比例模型,并应用参数敏感性分析和基本图解析结果揭示不同网联辅助设备安装率对混合交通流通行能力的影响。

1 车辆类型及比例分析

假设单车道上存在由 RV、CRV、CACC、ACC 车辆构成的混合交通流,且 CRV 只为紧随其后的 CACC 车辆提供当前车辆的行驶信息,不影响自身的行驶,其本质上仍为人工驾驶。其中,当 CACC 车辆跟驰前车为 RV 时,前车不能为后车提供行驶信息, CACC 车辆退化为 ACC 车辆;当 CACC 车辆跟驰前车为 CRV 时,前车能为后车提供行驶信息, CACC 车辆不退化,如图 1 所示。当 CRV 跟驰前车为 RV 或 CRV 时,由于其网联辅助驾驶设备只对紧随其后的 CACC 车辆提供服务,故其跟驰行为同人工车辆一致。

假设道路上车辆总数为 N 辆, CACC 车辆的渗透率为 P 、网联辅助驾驶设备安装率为 m , 则 CRV、RV 的比例分别为 $P_{CRV} = m(1-P)$ 、 $P_{RV} = (1-P)(1-m)$ 。

当 CACC 车辆跟驰前车为 RV 时, CACC 车辆退化为 ACC 车辆, ACC 车辆比例为 $P_{ACC} = (1-P)(1-m)P$, CACC 车辆实际比例为 $P_{CACC} = P^2 + mP - mP^2$ 。

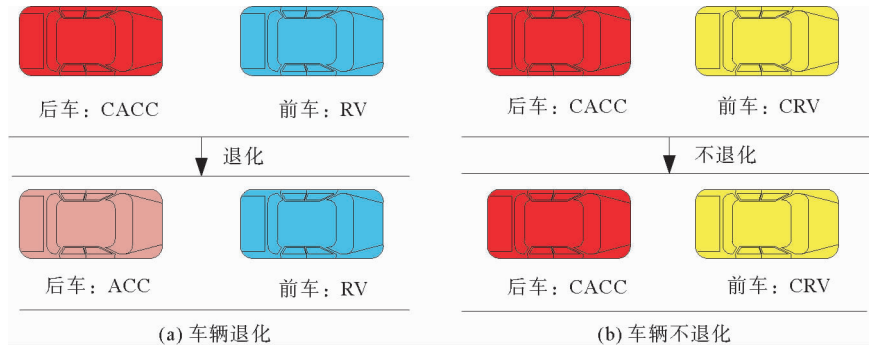


图1 CACC车辆是否退化为ACC车辆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of whether CACC vehicle degenerates into ACC vehicle

2 混合交通流基本图模型

当交通流处于平衡态时,所有车辆的速度差和加速度均为0。在同质交通流中,当所有车辆以同一平衡态速度行驶时,道路上各车辆的平衡态车头间距均相同;而对于混有网联车的混合交通流而言,当道路上所有类型车辆在同一平衡态速度下,不同类别车辆的平衡态车头间距因其类型不同而存在差异。

对于目前各类型车辆跟驰模型,可用下列一般性函数进行描述:

$$a_i(t) = g^j(v_i(t), \Delta v_i(t), h_i(t)) \quad (1)$$

式中: g^j 为第 j 类车辆跟驰模型的函数式, $j=1,2,3,4$ 分别表示RV、CRV、CACC、ACC车辆; $a_i(t)$ 为车辆 i 在 t 时刻的加速度; $v_i(t)$ 为车辆 i 在 t 时刻的速度; $\Delta v_i(t)$ 为车辆 i 与前车 $i-1$ 在 t 时刻的速度差; $h_i(t)$ 为车辆 i 与前车 $i-1$ 在 t 时刻的车头间距。

交通流在平衡态下满足:

$$\begin{cases} v = v^* \\ \Delta v = 0 \\ a = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v^* 为平衡态速度, Δv 为相邻车辆速度差, a 为加速度。

将式(2)代入式(1)得到:

$$0 = g^j(v^*(t), 0, h_j(t)) \quad (3)$$

式中, h_j 为第 j 类车辆跟驰模型下的平衡态车头间距。

由式(3)得各类车辆在平衡态下车头间距函数为:

$$h_j(t) = g^j(v^*(t)) \quad (4)$$

由假设知,CRV仍为人工驾驶车辆。CACC车辆跟驰RV时,退化为ACC车辆;而CACC车辆跟驰CRV时,不发生退化。故在混合交通流中,当RV分别跟驰CACC、ACC、CRV、RV车辆时,其平衡态车头间距均为 h_1 ;当CRV分别跟驰CACC、ACC、CRV、RV车辆时,其平衡态车头间距均为 h_2 ;当CACC车辆分别跟驰CACC、ACC、CRV、RV车辆时,其平衡态车头间距分别为 h_3 、 h_3 、 h_3 、 h_4 ;当ACC车辆跟驰RV时,其平衡态车头间距为 h_4 。

由文献[9,11,13]归纳可得混合交通流平衡态下的平均车头间距为:

$$\bar{h} = \frac{N \left(\sum_{j=1}^n P_j h_j \right)}{N} = \sum_{j=1}^n P_j h_j \quad (5)$$

式中: P_j 为第 j 类车辆在混合交通流中所占比例, N 为混合交通流中车辆总数。

根据交通流密度定义,得到混合交通流密度

$$k = \left(\sum_{j=1}^n P_j h_j \right)^{-1}. \quad (6)$$

由此可得混合交通流流量-密度基本图模型为:

$$\begin{cases} k = \left(\sum_{j=1}^n P_j h_j \right)^{-1}, \\ q = kv. \end{cases} \quad (7)$$

式中, q 为交通流流量。

3 通行能力案例分析

3.1 跟驰模型

已有研究^[13-14]表明,智能驾驶员模型(intelligent driver model, IDM)能很好描述人工车辆驾驶特性,故选择 IDM 模型来模拟人工车辆的驾驶特性,模型为:

$$a_{\text{IDM}} = a \left\{ 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left[\frac{s_0 + vT + v\Delta v / (2\sqrt{ab})}{h-l} \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

式中: a_{IDM} 为人工驾驶车辆加速度, a 为最大加速度, v_0 为自由流速度, Δv 为跟驰车辆与前车的速度差, δ 为加速度指数, s_0 为车辆制动的最小安全间距, l 为车身长度, T 为人工驾驶车辆安全车头时距, b 为期望减速度, h 为车头间距。相关参数取值如表 1 所示。

表 1 IDM 跟驰模型参数取值^[11]

Table 1 Parameter values of IDM tracking model

模型参数	$b/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	δ	s_0/m	l/m	T/s
参数值	2.8	1	33.3	4	2	5	1.5

加州大学 PATH 实验室通过实车试验,提出 CACC、ACC 车辆跟驰模型^[15],模型的参数值通过实车测试得到的数据标定,能很好地描述 CACC、ACC 车辆在连续流中的跟驰特性,具体模型分别如式(9)、式(10)所示。

$$\begin{cases} \dot{v} = v_p + k_p e + k_d \dot{e}, \\ \dot{e} = h - l - s_0 - vt_c. \end{cases} \quad (9)$$

式中: v_p 为上一控制时刻的速度; k_p 为车间距误差控制系数,取值 0.45; e 为前一控制时刻实际车间距与期望车间距的误差, \dot{e} 为 e 的微分; k_d 为车间距误差微分项控制系数,取值 0.25; t_c 为 CACC 车辆期望安全车头时距,取值 0.6 s。

$$\dot{v} = k_a (h - l - s_0 - vt_a) + k_b \Delta v. \quad (10)$$

式中: \dot{v} 为 v 的微分; k_a 、 k_b 为控制系数,其值分别为 0.23 s^{-2} 、 0.07 s^{-1} ; t_a 为 ACC 车辆期望保持的恒定车间时距,取值 1.1 s。

3.2 通行能力分析

针对由 RV、CRV、CACC、ACC 车辆构成的混合交通流,平衡态速度 v 取 $0 \sim 33.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (自由流速度以内),根据式(7)~(10)和各类车辆分布比例,可得混合交通流流量-密度基本图模型为:

$$\begin{cases} k = \left((1-P) \left(l + \frac{s_0 + vT}{\sqrt{1 - (v/v_0)^4}} \right) + (1-P)(1-m)P(s_0 + l + t_a v) + (P^2 + mP - kP^2)(s_0 + l + t_c v) \right)^{-1}, \\ q = kv. \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)知,混合交通流基本图模型与 CACC 车辆渗透率 P 、网联辅助驾驶设备安装率 m 有关。不同辅助驾驶设备安装率 m 下,不同 P 值对混合交通流通行能力的影响情况如图 2 所示。不同 m 、 P 值下,混

合交通流最大通行能力及提升情况,分别如表2、表3所示。

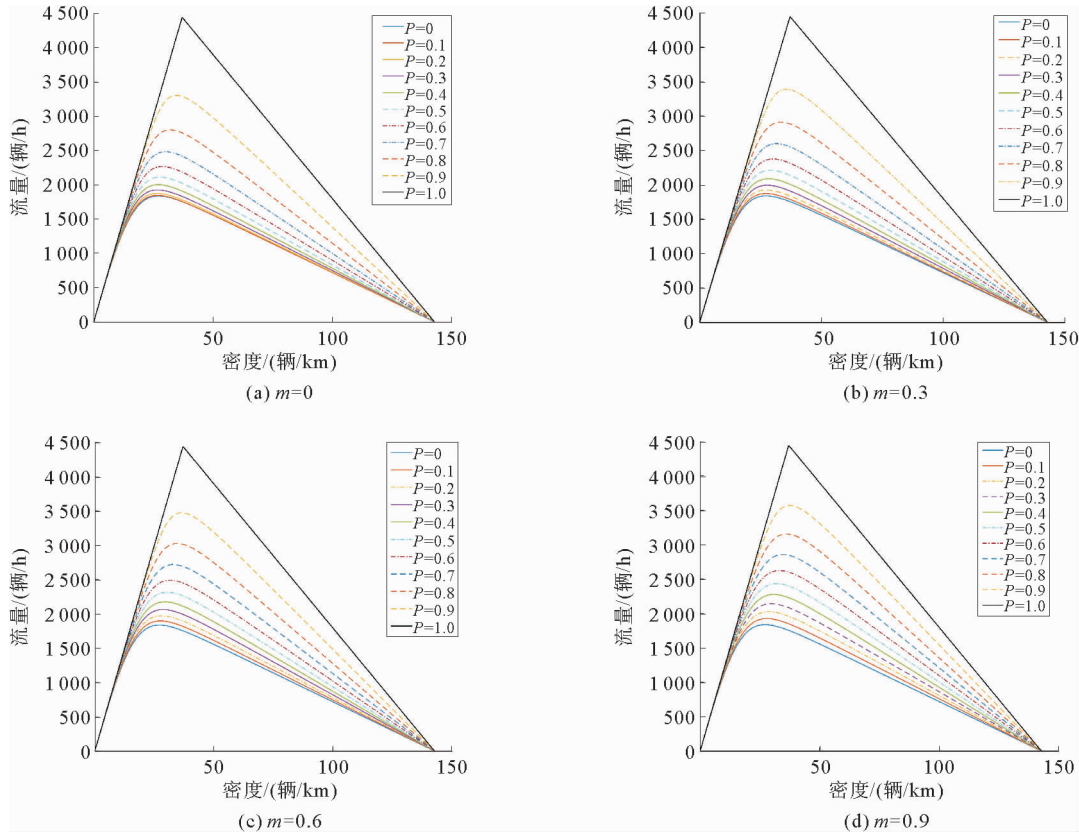


图2 $t_a=1.1$ s时,不同 m 值下 P 的混合流 $q-k$ 曲线图

Fig. 2 $q-k$ curves of mixed flow with respect to P under different m values when $t_a=1.1$ s

表2 $t_a=1.1$ s时,不同 m, P 值下最大通行能力对比分析

Table 2 Comparative analysis of the maximum capacity under different m and P values when $t_a=1.1$ s 辆/h

P	$m=0$	$m=0.1$	$m=0.2$	$m=0.3$	$m=0.4$	$m=0.5$	$m=0.6$	$m=0.7$	$m=0.8$	$m=0.9$	$m=1.0$
0	1 836	1 836	1 836	1 836	1 836	1 836	1 836	1 836	1 836	1 836	1 836
0.1	1 889	1 893	1 897	1 902	1 907	1 911	1 916	1 920	1 925	1 930	1 934
0.2	1 955	1 964	1 972	1 981	1 990	1 998	2 007	2 016	2 025	2 035	2 044
0.3	2 039	2 051	2 064	2 076	2 089	2 102	2 115	2 128	2 141	2 154	2 168
0.4	2 145	2 160	2 176	2 192	2 208	2 224	2 241	2 258	2 275	2 292	2 310
0.5	2 279	2 297	2 316	2 334	2 353	2 373	2 393	2 413	2 433	2 454	2 475
0.6	2 451	2 471	2 492	2 513	2 534	2 555	2 577	2 600	2 622	2 646	2 669
0.7	2 677	2 698	2 720	2 742	2 764	2 786	2 809	2 832	2 856	2 880	2 904
0.8	2 987	3 007	3 027	3 048	3 069	3 090	3 111	3 133	3 155	3 177	3 199
0.9	3 445	3 460	3 475	3 490	3 506	3 521	3 537	3 552	3 568	3 584	3 600
1.0	4 443	4 443	4 443	4 443	4 443	4 443	4 443	4 443	4 443	4 443	4 443

由图2和表2、表3可知,当 $P \leq 0.2$ 时, m 值每提高 0.1, 最大通行能力提升小于 0.5%, 且当 $m=1$ 时, 最大通行能力提升仅 5.34%, 混合交通流通行能力提升不显著; 当 $P \geq 0.3$ 时, m 值每提高 0.1, 最大通行能力提升大于 0.5%; 并且, 当 $P=0.3$ 且 $m \geq 0.8$ 时, 或 $P=0.4$ 且 $m \geq 0.6$, 或 $P \geq 0.5$ 且 $m \geq 0.5$ 时, 最大通行能力提升大于 5%, 此时混合交通流通行能力提升显著。

由图3、表4可知,当 $P \leq 0.1$ 时, m 值每提高0.1,最大通行能力提升小于0.5%,且当 $m=1$ 时,最大通行能力提升仅5.34%,混合交通通行能力提升不显著;当 $P=0.2$ 且 $m \geq 0.6$,或 $P=0.3$ 且 $m \geq 0.5$,或 $P=0.4$ 且 $m \geq 0.4$,或 $P \geq 0.5$ 且 $m \geq 0.3$ 时,最大通行能力提升大于5%,此时提高 m 值有利于通行能力的快速提升。

令 $t_a = 2.2$ s,计算不同 m 、 P 值时的混合交通流量-密度基本图解析曲线以及最大通行能力提升情况,如图4、表5所示。

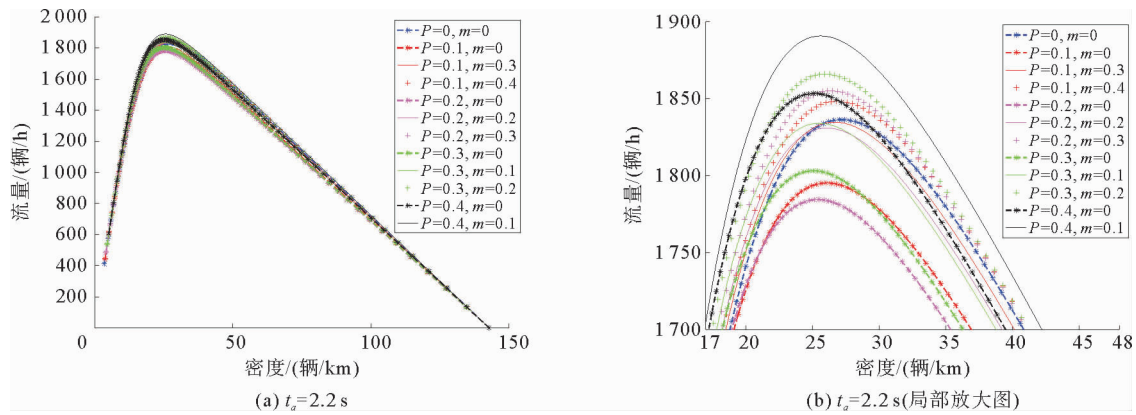


图4 m 值对 P 值的影响分析($t_a = 2.2$ s)

Fig. 4 Influence analysis of m value on P value ($t_a = 2.2$ s)

表5 $t_a = 2.2$ s时,不同 m 、 P 值下最大通行能力提升幅度

Table 5 Improvement of maximum capacity under different m and P values when $t_a = 2.2$ s

P	$m=0$	$m=0.1$	$m=0.2$	$m=0.3$	$m=0.4$	$m=0.5$	$m=0.6$	$m=0.7$	$m=0.8$	$m=0.9$	$m=1.0$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	-2.23	-1.53	-0.82	-0.05	0.65	1.42	2.18	2.94	3.76	4.52	5.34
0.2	-2.78	-1.58	-0.27	1.03	2.40	3.76	5.23	6.64	8.17	9.75	11.33
0.3	-1.80	-0.11	1.63	3.43	5.28	7.24	9.26	11.33	13.51	15.74	18.08
0.4	0.93	3.00	5.12	7.30	9.64	12.04	14.54	17.16	19.93	22.82	25.82
0.5	5.72	8.06	10.51	13.02	15.69	18.52	21.46	24.51	27.78	31.21	34.80
0.6	13.18	15.74	18.41	21.24	24.18	27.29	30.50	33.93	37.53	41.34	45.37
0.7	24.46	27.18	30.01	32.95	36.06	39.32	42.70	46.30	50.05	53.98	58.17
0.8	41.94	44.66	47.44	50.33	53.32	56.48	59.75	63.13	66.67	70.37	74.24
0.9	71.41	73.58	75.82	78.16	80.50	82.95	85.40	87.96	90.63	93.30	96.08
1.0	141.99	141.99	141.99	141.99	141.99	141.99	141.99	141.99	141.99	141.99	141.99

由图4、表5可知,在 $t_a = 2.2$ s条件下,当 $P=0.3$ 且 $m < 0.2$,或 $P=0.2$ 且 $m < 0.3$,或 $P=0.1$ 且 $m < 0.4$ 时,混合交通通行能力低于传统人工车辆通行能力;当 $P=0.1$ 且 $m \geq 0.4$ 时,能阻止交通通行能力恶化;当 $P=0.2$ 且 $m \geq 0.6$,或 $P=0.3$ 且 $m \geq 0.4$,或当 $P \geq 0.4$ 且 $m \geq 0.3$ 时,最大通行能力提升大于5%,此时提高 m 值有利于通行能力的快速提升。

4 数值仿真

基于 Matlab 软件进行数值仿真试验,对一条随机分布 100 辆各种类型车辆的单车道路段,假设 CACC 车辆渗透率为 P ,人工车辆网联辅助驾驶设备安装率为 $m=0.5$,则实际传统人工车辆比例为 $(1-m)(1-P)$ 。分别取 $t_a = 1.1, 1.6, 2.2$ s进行数值仿真试验,验证渗透率 P 对混合交通通行能力影响。令仿真步长为0.01 s,同时考虑各类车辆相对位置随机分布,分别对每个渗透率仿真3次,统计不同渗透率下混合交

通流通行能力的均值,结果分别如表6~8所示。对比理论计算值和仿真实验值,可以发现,理论值与仿真值最大误差小于5%,可以认为理论值与仿真值基本吻合,验证了理论推导的正确性。

表6 $t_a=1.1$ s且 $m=0.5$ 时,不同 P 值下通行能力仿真结果

Table 6 Simulation results of capacity under different P values when $t_a=1.1$ s and $m=0.5$

对比项	$P=0.1$	$P=0.2$	$P=0.3$	$P=0.4$	$P=0.5$	$P=0.6$	$P=0.7$	$P=0.8$	$P=0.9$
理论值/(辆/h)	1 911	1 998	2 102	2 224	2 373	2 555	2 786	3 090	3 521
仿真值/(辆/h)	1 921	2 012	2 115	2 238	2 378	2 581	2 818	3 130	3 554
误差/%	0.5	0.7	0.6	0.6	0.2	1.0	1.1	1.3	0.9

表7 $t_a=1.6$ s且 $m=0.5$ 时,不同 P 值下通行能力仿真结果

Table 7 Simulation results of capacity under different P values when $t_a=1.6$ s and $m=0.5$

对比项	$P=0.1$	$P=0.2$	$P=0.3$	$P=0.4$	$P=0.5$	$P=0.6$	$P=0.7$	$P=0.8$	$P=0.9$
理论值/(辆/h)	1 889	1 955	2 039	2 145	2 279	2 451	2 677	2 987	3 445
仿真值/(辆/h)	1 893	1 987	2 066	2 184	2 300	2 504	2 740	3 066	3 513
误差/%	0.2	1.6	1.3	1.8	0.9	2.1	2.3	2.6	1.9

表8 $t_a=2.2$ s且 $m=0.5$ 时,不同 P 值下通行能力仿真结果

Table 8 Simulation results of capacity under different P values when $t_a=2.2$ s and $m=0.5$

对比项	$P=0.1$	$P=0.2$	$P=0.3$	$P=0.4$	$P=0.5$	$P=0.6$	$P=0.7$	$P=0.8$	$P=0.9$
理论值/(辆/h)	1 862	1 905	1 969	2 057	2 176	2 337	2 558	2 873	3 359
仿真值/(辆/h)	1 872	1 947	2 005	2 070	2 230	2 403	2 688	2 995	3 465
误差/%	0.5	2.2	1.8	0.6	2.4	2.7	4.8	4.1	3.1

由表7、表8可知,当 $t_a=2.2$ s, $P=0.3$ 且 $m \geq 0.2$,或 $P=0.2$ 且 $m \geq 0.3$,或 $P=0.1$ 且 $m \geq 0.4$ 时,可有效防止混合交通流通行能力恶化现象;当 $P=0.2$ 且 $m \geq 0.6$,或 $P=0.3$ 且 $m \geq 0.4$,或 $P \geq 0.4$ 且 $m \geq 0.3$ 时,提高 m 值有利于通行能力的快速提升;当 $t_a=1.6$ s, $P=0.2$ 且 $m \geq 0.6$,或 $P=0.3$ 且 $m \geq 0.5$,或 $P=0.4$ 且 $m \geq 0.4$,或 $P \geq 0.5$ 且 $m \geq 0.3$ 时,提高 m 值有利于通行能力的快速提升。

5 结论及展望

1) 针对由RV、CRV、CACC以及由CACC车辆跟驰RV退化而来的ACC车辆构成的混合交通流,分析了空间跟驰模式,推导了数学解析表达。

2) 建立了混合交通流基本图模型,研究了不同网联辅助驾驶设备安装率和自适应巡航控制车辆期望车间时距对通行能力的影响。当期望车间时距为1.1 s、网联车辆渗透率分别为0.3、0.4、0.5,且网联辅助驾驶设备安装率分别不低于0.8、0.6、0.5时,最大通行能力提升大于5%;当期望车间时距为1.6 s、渗透率分别为0.2、0.3、0.4,且对应的安装率不低于0.6、0.4、0.3时,最大通行能力提升大于5%,继续提高网联辅助设备安装率有利于混合交通流通行能力的快速提升;当期望车间时距为2.2 s、渗透率分别为0.3、0.2、0.1,且对应的安装率分别不低于0.2、0.3、0.4时,可有效改善混合交通流通行能力恶化现象。

3) 针对CACC车辆跟驰RV退化为ACC车辆,导致混合交通流通行能力恶化问题,可对RV安装一定比例的网联辅助驾驶设备来阻止这种恶化现象的发生。

随着车联网技术的日益发展,研究网联车辆组队行驶及其相关参数对混合交通流通行能力的影响,将是未来的方向。

参考文献:

- [1] 杨龙海,张春,仇晓赞,等.车辆跟驰模型研究进展[J].交通运输工程学报,2019,19(5):125-138.
YANG Longhai,ZHANG Chun,QIU Xiaoyun, et al.Research progress on car-following models[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2019,19(5):125-138.
- [2] KNORR F,SCHRECKENBERG M.Influence of inter-vehicle communication on peak hour traffic flow[J].Physica A:Statistical Mechanics and its Applications,2012,391(6):2225-2231.
- [3] FRANCISCO N,VICENTE M.Mixing V2V- and non-V2V-equipped vehicles in car following[J].Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2019,108(C):167-181.
- [4] TALEBPOUR A,MAHMASSENI H S.Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput[J].Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2016,71:143-163.
- [5] SHLADOVER S E,SU D Y,LU X Y.Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow[J].Transportation Research Record,2012,2324(1):63-70.
- [6] 秦严严,宋永朝,何兆益.混有自适应巡航控制汽车的交通流通行能力分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(5):115-121.
QIN Yanyan,SONG Yongchao,HE Zhaoyi.Capacity analysis of traffic flow mixed with adaptive cruise control vehicles[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(5):115-121.
- [7] 徐伟,梁文丽,刘海青.V2V环境下基于改进OV模型的交叉口通行效率分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(3):116-122.
XU Wei,LIANG Wenli,LIU Haiqing.Traffic efficiency analysis of intersections based on improved OV model in V2V environment[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2021,40(3):116-122.
- [8] XIE D F,ZHAO X M,HE Z B.Heterogeneous traffic mixing regular and connected vehicles:Modeling and stabilization[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2019,20(6):2060-2071.
- [9] 徐桃让,姚志洪,蒋阳升,等.智能网联车环境下考虑反应时间影响的基本图模型[J].公路交通科技,2020,37(8):108-117.
XU Taorang,YAO Zhihong,JIANG Yangsheng, et al.Fundamental diagram model of considering reaction time in environment of intelligent connected vehicles[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2020,37(8):108-117.
- [10] YAO Z H,HU Y,WANG Y, et al.Stability analysis and the fundamental diagram for mixed connected automated and human-driven vehicles[J/OL].Physica A:Statistical Mechanics and its Applications,2019,533(C).DOI:10.13140/RG.2.35873.45920/1.
- [11] 秦严严,王昊,王炜,等.混有CACC车辆和ACC车辆的异质交通流基本图模型[J].中国公路学报,2017,30(10):127-136.
QIN Yanyan,WANG Hao,WANG Wei, et al.Fundamental diagram model of heterogeneous traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles and adaptive cruise control vehicles[J].China Journal of Highway and Transport,2017,30(10):127-136.
- [12] QIN Y Y,WANG H,NI D.Lighthill-Whitham-Richards model for traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles[J].Transportation Science,2021,55(4):883-907.
- [13] 常鑫,李海舰,荣建,等.混有智能网联车队的交通流基本图模型分析[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(4):782-788.
CHANG Xin,LI Haijian,RONG Jian, et al.Analysis on fundamental diagram model for mixed traffic flow with connected vehicle platoons[J].Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2020,50(4):782-788.
- [14] TREIBER M,HENNECKE A,HELBING D.Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J].Physical Review E,2000,62(2):1805-1824.
- [15] MILANES V,SHLADOVER S E.Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J].Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2014,48:285-300.

(责任编辑:齐敏华)