DOI:10.11918/202009089

高速公路合流区主要参数对自动驾驶车辆的影响

梁国华, 石 权, 李 瑞, 陈亦新, 王宝杰, 苏晓智

(长安大学 运输工程学院, 西安 710064)

摘 要: 为探究现有高速公路合流区对自动驾驶车辆的适应性,分析现有高速公路合流区加速车道长度和通视三角区角度对自动驾驶交通流的影响规律,并与传统交通流进行对比。依据自动驾驶车辆在感知、跟驰和换道行为以及与周围车辆的协作方面更迅速安全等特点,改进了 Krauss 跟驰模型和 LC2013 换道模型以适应自动驾驶车辆特征。依据车辆换道可接受间隙建立车辆跟驰间距计算公式,在满足换道安全的基础上对跟驰模型参数进行改进。结果表明:在现有的高速公路合流区平面设计参数条件下,自动驾驶交通流的安全性、效率及稳定性均优于传统交通流,与传统交通流相比,自动驾驶交通流冲突数减少了 100%,平均延误降低了 60%~71%,平均车速提高了近 20%且更稳定;在不同平面设计参数下,自动驾驶车辆的冲突数均为 0,平均延误保持在 0.65 s 左右,平均车速稳定在 33~34 m/s。现有的高速公路合流区平面设计参数在安全、效率和稳定性方面均能较好地适应自动驾驶车辆,且参数的取值对自动驾驶车辆影响不大。

关键词: 高速公路合流区;自动驾驶车辆;加速车道;通视三角区;车头时距;跟驰间距

中图分类号: U491.265 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2021)09-0062-07

Impact of main parameters of merging area in highway on autonomous vehicles

LIANG Guohua, SHI Quan, LI Rui, CHEN Yixin, WANG Baojie, SU Xiaozhi

(College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to explore the adaptability of the existing merging area in highway to autonomous vehicles, the influence of the acceleration lane length and the visibility triangle angle of existing highway merging area on the automatic traffic flow was analyzed, and results were compared with those of traditional traffic flow. Based on the characteristics of autonomous vehicles in terms of perception, car-following, and lane-changing behaviors, as well as the collaboration with surrounding vehicles, the Krauss car-following model and LC2013 lane-changing model were improved to adapt to the characteristics of autonomous vehicles. According to the lane-changing characteristics of the vehicles, a formula was established for calculating the acceptable safety gap when changing lanes, and the car-following model parameters were adjusted while fulfilling the requirement of lane-changing safety. Results show that under the existing plane design parameters of merging area in highway, the safety, efficiency, and stability of automatic traffic flow were better than those of traditional traffic flow. Compared with traditional vehicles, the number of collisions of automatic traffic flow reduced by nearly 100%, average delay reduced by 60% to 71%, average vehicle speed increased by nearly 20%, and the speed was more stable. Under different plane design parameters of merging area, the number of collisions of automatic traffic flow was 0, the average delay was maintained at around 0.65 s, and the average speed was stable at 33-34 m/s. The existing plane design parameters of merging area in highway well adapted to the autonomous vehicles in terms of safety, efficiency, and stability, and the parameter values of the merging area had little effect on the autonomous vehicles.

Keywords: merging area in highway; autonomous vehicles; acceleration lane; visibility triangle; time headway; car-following distance

近年来,道路上逐渐出现了一些具有自动驾驶功能的新型车辆,如具有自适应巡航控制、车道引导和预警系统等辅助功能的智慧车辆,预计未来更高水平的自动驾驶车辆将会出现在道路上。鉴于目前大规模的实车试验不可实现,自动驾驶车辆的相关研究大多集中在建模及仿真层面,常用的传统车辆跟随模型包括 IDM 模型、Gipp 模型、W99 模型等[1-3],在换道模型方面,学者们侧重于车辆换道可接受间隙研究,提出了考虑道路环境、交通环境、天气、驾驶人行为等因素的更完备的换道模型[4-6]。虽然当前传统车辆的跟驰和换道模型已经发展成熟,但这些模型是否适用于自动驾驶车辆尚待研究。除此之外,车辆在行驶过程中的跟驰和换道行为相

收稿日期: 2020-09-18
基金项目: 国家自然科学基金(52002033);
陕西省自然科学计划项目(2020JM-222);
中央高校基本科研业务费专项资金(300102210204)
作者简介: 梁国华(1977—),男,教授,博士生导师
通信作者: 陈亦新,chenyixin13@163.com

互影响，而以往大多数针对单一的跟驰或者换道行为的研究结果具有一定的局限性。

过去的 10 年中，对于自动驾驶车辆的广泛研究已经从多个方面论证了自动驾驶车辆的加入对道路交通产生了积极影响。文献[7]发现由于自动驾驶车辆的加入，高速公路通行能力增加了 43%。文献[8]基于改进的元胞自动机模型得出通行能力和自由流速度随着道路中自动驾驶车辆渗透率的增加而增大。文献[9]分析了自动驾驶环境下，车流的机动性、安全性、排放和燃料消耗都得到了改善。虽然关于自动驾驶车辆对道路交通所产生影响的研究较多，但这些研究都是基于单一的道路结构及尺寸，然而实际中道路设计参数并不完全相同，因此有必要研究不同设计参数对自动驾驶车辆的影响。

由于主线车流与匝道车流的交汇，使得车辆在高速公路合流区的行为相对复杂，其冲突频率与严重程度明显高于其他区域[10-11]。已有研究表明，驾驶人特性、合流区的几何构造和交通量及其组成都会对合流区的车流运行产生一定的影响[12]。在几何构造方面，学者们针对加速车道进行了大量研究，而很少有学者研究通视三角区角度对交通流的影响。事实上，在合流处，车辆驶出匝道时，如果仅仅依靠驾驶人前视野以及车辆后视镜视野，在主线上可能会出现一个视野盲区，视野盲区的范围与通视三角区角度有一定的关联[13]。合流区通视三角区是针对车辆合流时驾驶人的视野盲区来设计的，而自动驾驶车辆由于不受驾驶人人为因素的限制，其运行是否会受到通视三角区的影响尚不明确，因此本文通过仿真来探究通视三角区是否对自动驾驶车辆产生影响以及可能的影响规律。

综上，本文基于现有的 Krauss 跟驰模型、LC2013 换道模型以及自动驾驶车辆行为特征，在评估换道安全的基础上对模型进行改进以适应自动驾驶车辆的运行特征。以传统车辆作为对照，从安全、效率以及稳定性 3 个方面探究高速公路合流区通视三角区角度及加速车道长度对自动驾驶交通流运行的影响。研究结果将为未来智慧高速公路设计规范的编制提供一定的理论基础。

1　车辆跟驰与换道模型建立

美国汽车工程师学会(SAE)在 2016 年定义了 6 个级别的自动驾驶车辆特性，从 0 级(完全手动)到 5 级(完全自动)，确定自动驾驶车辆级别的最重要因素是人类在驾驶中的参与程度。此外，学者们认为与传统车辆相比，自动驾驶车辆所需的安全车头时距、车头间距更小，车速变化更平稳，且在跟驰与换道过程中与周围车辆的合作意愿更积极[9,14]。基于此，本文依据车辆换道安全的可接受间隙建立一个车辆跟驰间距计算模型并结合自动驾驶车辆的车头时距计算出最小安全间距，同时改进现有模型以消除人为因素的影响并修改车辆换道时的合作意愿来进一步适应自动驾驶车辆运行特征。

本文通过微观仿真软件 SUMO 来实现自动驾驶车辆的仿真。目前 SUMO 中车辆模型需要解决的问题在于车辆换道与跟驰之间的相互作用，文献[15]认为，在评估变道安全性时修改跟驰模型参数将有助于提高需要紧急变道场景的真实性，如高速公路分、合流区。

1.1　可接受间隙计算

合流区车辆换道行为主要表现为加速车道上的车辆向主线车道汇合，为保证主线车辆和匝道车辆行驶安全，需要确定一个合理的间隙以便加速车道上的车辆能够安全汇入主线车流，如图 1 所示。

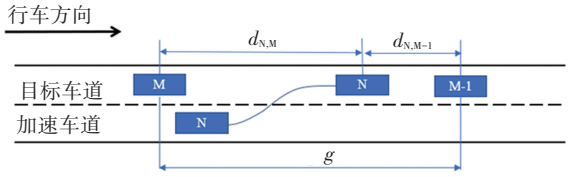


图 1　车辆变道示意

Fig.1　Schematic diagram of vehicle lane-changing

车辆可执行换道行为的安全条件为

$$d_{N,M} > d_{min} \tag{1}$$

$$d_{N,M-1} > d_{min} \tag{2}$$

式中：$d_{N,M}$ 为车辆 N 和车辆 M 之间的距离，$d_{N,M-1}$ 为车辆 N 和车辆 M−1 之间的距离，d_{min} 为车辆可接受的最小车辆间距，计算公式[16]为

$$d_{min} = \max\left\{\left[t_{h,min} + \frac{(t_h - t_{h,min})\max(0, t_p - t_{N,p})}{t_p}\right] v_N, d\right\} \tag{3}$$

其中：$t_{N,p}$ 为车辆 N 对低速行驶状态的可忍受时间，s；t_p 为车辆对低速行驶状态的最大忍耐时间，s；$t_{h,min}$ 为满足安全需求的最小车头时距，s；t_h 为多数车辆所选择的车头时距，s；d 为避免停车时前后车碰撞的最小间隙，取 2.5 m；v_N 为执行换道行为的车辆 N 的速度，m/s。

由图 1 可得

$$d_{N,M} + d_{N,M-1} > 2d_{min} \tag{4}$$

即

$$g > 2d_{min} \tag{5}$$

区别自动驾驶车辆与传统车辆的一个常见指标是车头时距。传统车辆的车头时距不应小于 0.9 s，而在美国相关法规中的建议值是 2 s，原则上，自动

驾驶车辆可以以 0.3~0.5 s 的车头时距驾驶[14]。依据式(3)~(5)计算出自动驾驶车辆换道时目标车道上的车辆最小安全间距。对于传统车辆的车头间距的研究中,有学者研究不同情形下的车辆行驶安全车头间距,发现当车速为 70 km/h 时,车头间距取值为 30~50 m[17-18]。本文取传统车辆行驶时的最小安全间距为 35 m。

1.2 车辆跟驰模型和换道模型改进

LC2013 模型认为车辆在换道时,不同性格的驾驶人会产生不同的合作意愿,用 lcCooperative 表示车辆换道时的合作意愿,为了消除驾驶人主观意愿对车辆换道的影响,将自动驾驶车辆的合作意愿值设为 1,表示自动驾驶车辆在变道时均与周围车辆进行合作变道。

依据车辆换道安全性对 Krauss 跟驰模型中的最小车头时距、行车最小安全间距等参数进行改进,并对模型进行优化以适应自动驾驶车辆跟驰特征。

SUMO 中的 Krauss 模型是无碰撞模型,在每一个仿真步长,首先计算安全车速:

$$v_s = v_l + \frac{g - v_t t_\tau}{(v_l + v_t)/2a + t_\tau} \tag{6}$$

式中:v_s 为跟驰车辆的安全车速,m/s;v_l 为前车速度,m/s;g 为车头间距,m;v_t 为跟驰车辆当前车速,m/s;a 为车辆最大减速度,m/s^2;t_τ 为驾驶员的反应时间,s。

以式(4)计算的 g 值作为 Krauss 模型中的车头间距值。在计算出安全车速之后,Krauss 模型根据其更新策略计算下一个仿真步长的车速及位置:

$$v_d = \min\{v_s, v_m, v_t + t_{sl} a_m\} \tag{7}$$

$$v_p = v_d - \varepsilon[v_s - (v_t - t_{sl} a_m)] \tag{8}$$

$$v_{t+1} = \mathrm{ran}(v_p, v_d) \tag{9}$$

$$x_{t+1} = x_t + t_{sl} v_{t+1} \tag{10}$$

式中:v_d 为车辆期望车速,m/s;a_m 为车辆最大加速度,m/s^2;v_m 为最大车速,m/s;v_p 是由于驾驶员的不完美驾驶,与期望速度所产生的最大差值时的速度,m/s;ε 是由于驾驶人的心理及生理特性所产生的速度折减因数;v_{t+1} 为跟驰车辆在下一个仿真步长的车速,m/s;$\mathrm{ran}(v_p, v_d)$ 表示在区间 (v_p, v_d) 内随机取值;x_{t+1} 为下一个仿真步长车辆的位置;t_{sl} 为仿真步长,s。

文献[19]认为驾驶人的心理、生理及眼动特性均能影响驾驶行为,而自动驾驶车辆的一个显著特征是摆脱了驾驶人等因素对驾驶行为的影响。改进 Krauss 模型以忽略驾驶人的不确定因素所产生的车辆速度折减,由式(7)~(9)可得自动驾驶车辆的速度计算式:

$$v_{t+1} = v_d = \min\{v_s, v_m, v_t + t_{sl} a_m\} \tag{11}$$

2 合流区平面设计参数及仿真方案设计

2.1 合流区类型及平面设计参数取值范围确定

本文研究对象是高速公路合流区,由于西安绕城高速公路入口多,分布相对密集,便于合流区基础数据的采集,且西安绕城高速在建设期间(1998 年—2003 年)是中国西部地区设计标准最高的双向六车道高速公路,具有一定的代表性,因此选取西安绕城高速公路合流区作为调查对象以获取合流区几何构造类型及参数取值范围。调查发现,加速车道为平行式、主线为三车道、匝道为单车道形式的合流区最多,如图 2 所示,将此类型合流区作为本文的研究对象。

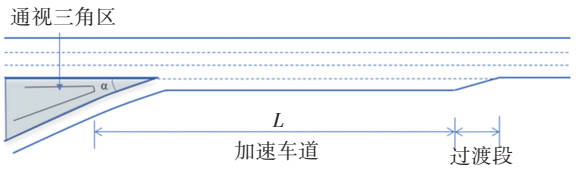


图 2 高速公路合流区几何构造

Fig.2 Geometric structure of merging area in highway

对西安绕城高速的 14 个此类型的合流区通视三角区角度 α 及加速车道长度 L 进行统计,数据见表 1。

表 1 合流区通视三角区角度与加速车道长度参数分布

Tab.1 Parameters distribution of visibility triangle angle and acceleration lane length in merging area

合流区编号	α/(°)	L/m
1	5	232
2	4	200
3	6	197
4	7	197
5	14	235
6	6	215
7	4	185
8	7.5	230
9	10	232
10	12.5	163
11	14	238
12	7.5	232
13	4	195
14	7	210

由表 1 可知,通视三角区角度为 4°~14°,加速车道长度为 163~238 m。结合《公路路线设计规范》与实际调查数据,确定通视三角区角度和加速车道长度两个变量的取值范围。通视三角区的取值

为 4°、8°、12°、16°；加速车道长度取值为 160、180、200、220、240 m。

2.2　仿真方案及实施

将仿真所需的自动驾驶车辆（AV）和传统车辆（HDV）按照表 2 设置。构建 20 种不同的加速车道长度和通视三角区角度的合流区场景，将实际调查结果中各个合流区同 1 h 内的车辆数换算成标准车辆数作为仿真车辆数，其中主线车辆为 2 300 pcu/h，匝道车辆为600 pcu/h。分别将两种交通流添加到所构建的 20 种合流区场景中进行仿真，仿真方案设计见表 3，单次仿真时长为 3 600 s。

表 2　车辆模型及参数设置

Tab.2　Setting of vehicle models and parameters

车辆类型	跟驰模型	换道模型	驾驶人不完美系数	车头时距/s	最小安全间隙/m	换道合作意愿
AV	改进后的 Krauss 模型	改进后的 LC2013 模型	0	0.5	14	1
HDV	Krauss 模型	LC2013 模型	0.5	1	35	0.5

表 3　仿真方案设计

Tab.3　Simulation scheme design

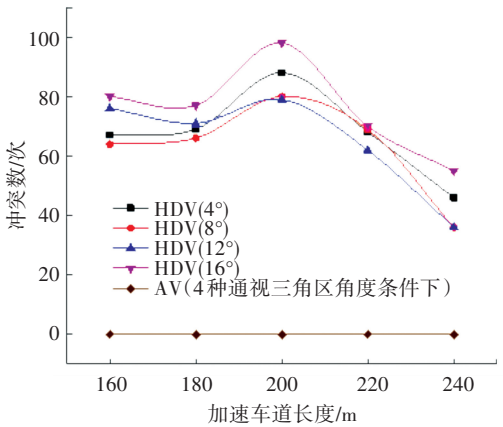
序号	α/(°)	L/m	车辆类型	序号	α/(°)	L/m	车辆类型
1	4	160	AV	21	4	160	HDV
2	8	160	AV	22	8	160	HDV
3	12	160	AV	23	12	160	HDV
4	16	160	AV	24	16	160	HDV
5	4	180	AV	25	4	180	HDV
6	8	180	AV	26	8	180	HDV
7	12	180	AV	27	12	180	HDV
8	16	180	AV	28	16	180	HDV
9	4	200	AV	29	4	200	HDV
10	8	200	AV	30	8	200	HDV
11	12	200	AV	31	12	200	HDV
12	16	200	AV	32	16	200	HDV
13	4	220	AV	33	4	220	HDV
14	8	220	AV	34	8	220	HDV
15	12	220	AV	35	12	220	HDV
16	16	220	AV	36	16	220	HDV
17	4	240	AV	37	4	240	HDV
18	8	240	AV	38	8	240	HDV
19	12	240	AV	39	12	240	HDV
20	16	240	AV	40	16	240	HDV

3　影响分析

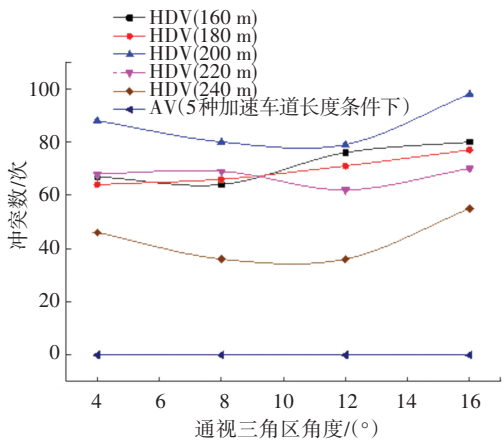
分别从安全、效率和稳定性 3 个方面探究高速公路合流区加速车道长度和通视三角区角度对两种交通流的影响规律。选取碰撞时间（TTC）作为冲突判定指标，文献[20]结合以往研究将传统车辆的 TTC 的阈值取值确定为 1～4 s。本文将传统车辆的 TTC 阈值取为 3 s，即当 TTC<3 时，冲突发生。由于自动驾驶车辆的反应能力强于人类驾驶员，自动驾驶车辆的冲突阈值要低于传统车辆，文献[20]在研究中将自动驾驶车辆的 TTC 阈值取为 1 s。因此本文将自动驾驶车辆的 TTC 阈值取为 1 s。同时以车辆平均延误来表征交通流运行效率，以每一仿真时刻道路中车辆运行的平均速度来表征车流运行的稳定性。

3.1　合流区平面设计参数对两种交通流运行安全的影响分析

图 3 为高速公路合流区加速车道长度和通视三角区角度对两种交通流的冲突数影响对比。



(a)加速车道长度



(b)通视三角区角度

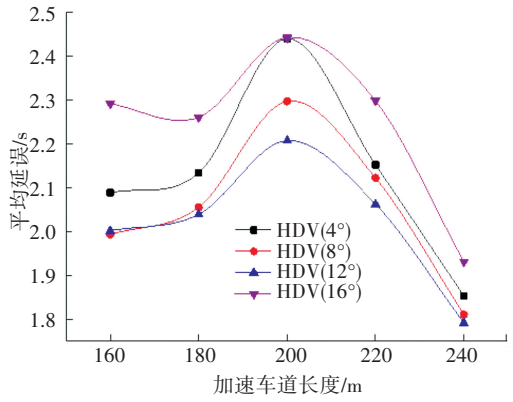
图 3　不同合流区平面设计参数下两种交通流的冲突数

Fig.3　Number of collisions of two types of traffic flow under different plane design parameters of merging area

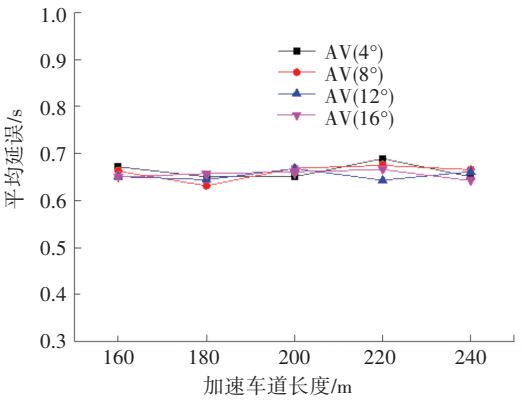
由图 3 可知,合流区平面设计参数尤其是加速车道长度对传统交通流有较大的影响,具体表现为随着加速车道长度的增加,传统交通流的冲突数先增加后减少,加速车道长度为 200 m 时道路中的平均冲突数最大,加速车道长度为 240 m 时道路中的平均冲突数最小;通视三角区角度对传统交通流运行无显著影响。而合流区平面设计参数对自动驾驶交通流基本无影响,不同加速车道长度和通视三角区角度条件下的自动驾驶交通流的冲突数均为 0。

3.2 合流区平面设计参数对两种交通流运行效率的影响分析

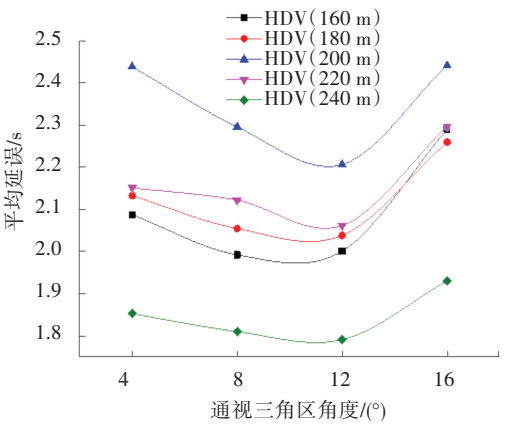
图 4 为高速公路合流区加速车道长度和通视三角区角度对两种交通流的运行效率影响对比。



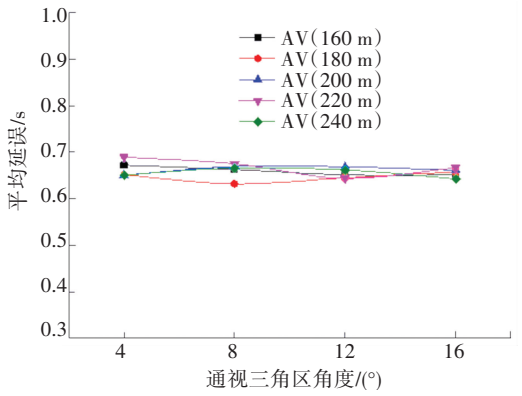
(a)加速车道长度对传统交通流的影响



(b)加速车道长度对自动驾驶交通流的影响



(c)通视三角区角度对传统交通流的影响



(d) 通视三角区角度对自动驾驶交通流的影响

图 4 不同合流区平面设计参数下两种交通流的平均延误

Fig.4 Average delay of two types of traffic flow under different plane design parameters of merging area

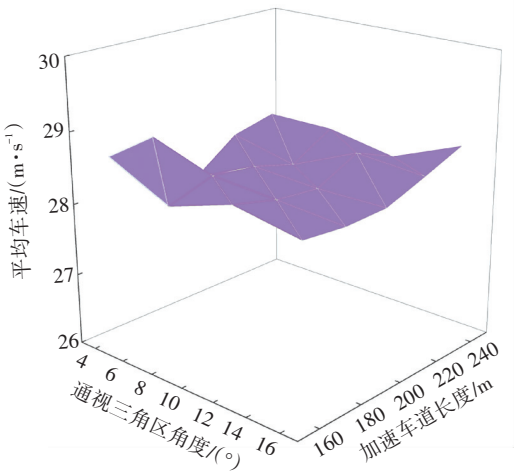
由图 4 可知,加速车道长度和通视三角区角度对传统交通流有较大的影响,随着加速车道长度增加,传统交通流的平均延误先增加后减少,在加速车道长度为 200 m 时平均延误达到最大,在 240 m 时平均延误最小;而随着通视三角区角度的增加,传统车辆的平均延误先减小后增大,在 12°左右达到最小。而合流区平面设计参数对自动驾驶交通流的影响较小,在不同参数条件下,自动驾驶交通流的平均延误基本稳定在 0.6~0.7 s,比传统交通流减少了 60%~71%。

3.3 合流区平面设计参数对两种交通流稳定性的影响分析

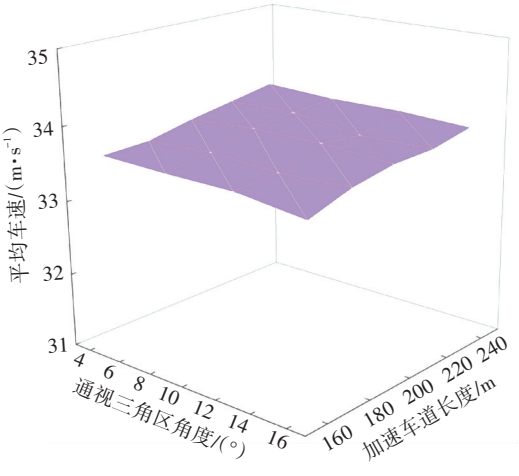
分别在不同的合流区通视三角区角度和加速车道长度条件下比较两种交通流的平均车速,如图 5 所示。

由图 5 可知,不同合流区平面设计参数对两种交通流平均速度的影响具有差异性,传统交通流的平均车速在 27~29 m/s 之间变化,而自动驾驶交通流的平均车速保持在 33~34 m/s 之间。选取其中一组加速车道长度和通视三角区角度条件下两种交通流的平均速度,如图 6 所示。

由图 6 可知,在一定的合流区平面设计参数下,每一时刻自动驾驶交通流平均速度的 μ 为 33.33 m/s、σ^2 为 4.47;每一时刻传统交通流平均速度的 μ 为 28.61 m/s、σ^2 为 8.77。显然,在特定的平面设计参数下,自动驾驶交通流比传统交通流运行效率更高,且自动驾驶交通流更稳定。



(a) 传统车辆的平均车速



(b) 自动驾驶车辆的平均车速

图 5　合流区平面设计参数对两种交通流平均车速的影响

Fig.5　Influence of plane design parameters of merging area on average speed of two types of traffic flow

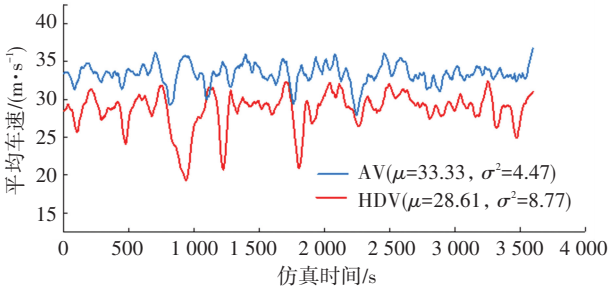


图 6　两种交通流在不同时刻的平均车速

Fig. 6　Average speed of two types of traffic flow at different times

4　结　论

1) 在评估换道安全的基础上改进 LC2013 换道模型和 Krauss 跟驰模型以适应自动驾驶车辆特征，以传统车辆作为对照组，从安全、效率以及稳定性 3 个方面探究了高速公路合流区通视三角区角度和加速车道长度对自动驾驶车辆运行的影响规律。

2) 在不同的合流区平面设计参数取值条件下，与传统交通流相比，自动驾驶交通流的冲突数减少到 0，平均延误降低了 60%～71%，平均车速提高了近 20%，且速度波动范围更小。即在现有的合流区平面设计参数条件下，自动驾驶车辆不仅能够明显改善车辆运行的安全性，还能有效提高运行效率及稳定性。

3) 合流区平面设计参数尤其是加速车道长度对传统交通流的运行具有显著影响，而平面设计参数对自动驾驶交通流基本无影响，在两种平面设计参数取不同值时，自动驾驶交通流运行的冲突数均为 0，平均延误基本保持在 0.6～0.7 s 之间，平均车速保持在 33～34 m/s 之间。

4) 由于目前条件尚无法支持实车试验，本文依据自动驾驶车辆运行特征，围绕自动驾驶车辆车头时距这一关键变量，通过理论推导来改进现有模型以适应自动驾驶车辆特征，后续将依据自动驾驶车辆实车试验结果来进一步完善自动驾驶车辆控制模型及参数以接近真实场景。

参考文献

[1] UMAIR D, CHRIS L, HANNA M. Calibrating the Wiedemann's vehicle-following model using mixed vehicle-pair interactions [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 67: 227

[2] KANAGARAJ V, ASAITHAMBI G, KUMAR C H N, et al. Evaluation of different vehicle following models under mixed traffic conditions [J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 104: 390

[3] JAFFRY S W, MUBASHER M, JAHANGIR R. Modeling of individual differences in car-following behavior of drivers [C]//Proceedings of the 20th IEEE International Multitopic Conference. Lahore: IEEE, 2017: 1

[4] GOSWAMI V, BHAM G H. Gap acceptance behavior in mandatory lane changes under congested and uncongested traffic on a multilane freeway [C]// Proceedings of the Transportation Research Board Meeting. Washington DC: [s.n.], 2007: 1

[5] GURUPACKIAM S, JONES S L. Empirical study of accepted gap and lane change duration within arterial traffic under recurrent and non-recurrent congestion [J]. International Journal for Traffic and Transport Engineering, 2012, 2(4): 306

[6] YANG Minming, WANG Xuesong. Modeling lane change gap acceptance and duration using Shanghai naturalistic driving data [C]// Proceedings of the 18th COTA International Conference of Transportation Professionals. [S.l.]: ASCE, 2018: 1918

[7] TIENTRAKOOL P, HO Y, MAXEMCHUK N F. Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance [C]// Proceedings of the 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). San Francisco: IEEE, 2011: 1

[8] LIU Yangzexi, GUO Jingqiu, TAPLIN J, et al. Characteristic analysis of mixed traffic flow of regular and autonomous vehicles using cellular automata [J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017: 1

[9] LI Duo, WAGNER P. Impacts of gradual automated vehicle penetration on motorway operation: a comprehensive evaluation [J]. European Transport Research Review, 2019, 11(1): 1

[10] 温惠英, 吴嘉彬, 漆巍巍,等. 高速公路入口匝道合流区的CP-CS融合模型 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 50
WEN Huiying, WU Jiabin, QI Weiwei, et al. CP-CS fusion model for on-ramp merging area on the highway [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 50

[11] AHAMMED M A, HASSAN Y, SAYED T A. Modeling driver behavior and safety on freeway merging areas [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(9): 370

[12] HOU Qinzhong, TARKO A P, MENG Xianghai. Investigating factors of crash frequency with random effects and random parameters models: new insights from Chinese freeway study [J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 120: 1

[13] GARCIA A, BELDAESPLUGUES E. Lateral vision angles in roadway geometric design [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(12): 654

[14] MAURER M, GERDES J C, LENZ B, et al. Autonomous driving: technical, legal and social aspects [M]. Berlin: Springer, 2016: 1

[15] ERDMANN J. SUMO's lane-changing model [M]. Modeling Mobility with Open Data. Berlin: Springer, 2015: 105

[16] LI Xiang, SUN Jianqiao. Studies of vehicle lane-changing dynamics and its effect on traffic efficiency, safety and environmental impact [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 467: 41

[17] CHEN Chen, LU Ning, LIU Lei, et al. Critical safe distance design to improve driving safety based on vehicle-to-vehicle communications [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3334

[18] WANG Hua, WEI Quan, WANG Yinhai, et al. Modeling of safe driving distance on the basis of vehicle-to-vehicle communication [J]. Transportation Research Record, 2013, 2381(2381): 28

[19] 裴玉龙, 周侃, 张诚. 酒精作用下驾驶人心理生理及眼动特性分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2011, 13(5): 80
PEI Yulong, ZHOU Kan, ZHANG Cheng. Analysis of driver's psycho-physiological and eye movement characteristics under alcohol effect [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2011, 13(5): 80

[20] VOGEL K. A comparison of headway and time to collision as safety indicators [J]. Accident Analysis & Prevention, 2003, 35(3): 427

(**编辑** 魏希柱)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“仿生机器鱼近壁面流场识别的人工侧线方法”,图片包含了仿生机器鱼三维样机模型、仿生机器鱼仿真模型、流场预测神经网络模型、速度场仿真云图以及流场预测评价指标曲面图。随着人类对海洋开发的深入,面临的水下作业环境也愈发险恶,受水质浑浊度和复杂非结构的水下地形环境影响,传统的光学成像和声纳探测技术应用受到了限制,严重制约了仿生水下机器人的作业能力,针对仿生机器鱼目标近距离作业时的环境识别难题,提出一种基于人工侧线(ALL)的近壁面流场识别方法。首先,理论分析了ALL感知近壁面流场环境的可行性;然后,建立了ALL虚拟压力传感器阵列并采用计算流体动力学(CFD)方法计算并提取了不同参数条件下(来流速度 v,靠壁距离 d 和游动频率 f) 仿生机器鱼的体表压强数据;最后,建立了基于多层前馈神经网络的来流速度和靠壁距离预测回归模型,并对模型结构和数据特征进行了优化。研究结果表明:壁面效应将引起鱼体周围流场结构的非对称分布,鱼体头部和尾部的侧线传感器对流场参数的辨识度高,消除弱相关的特征对来流速度和靠壁距离预测指标的影响小且有利于降低预测模型的复杂度。

(图文提供:谢鸥,宋爱国,苗静,孙兆光,沈晔湖。东南大学仪器科学与工程学院)