基于混合交通的机非交互秩序评价

——以南浔泰安西路为例

陆昆敏，庄一舟，詹小丽，周子健

（浙江工业大学土木工程学院，杭州 310000）

摘要：针对网联自动驾驶车辆(connected autonomous vehicle，CAV)渗透路网，对不同断面特性造成的机非交互情境差异性干扰交通流的情况进行秩序评价。以南浔泰安西路为例，引入 CAV 渗透比例，统计分析路段高峰期的交通流数据，提出了遗传算法校正 CAV 跟驰模型仿真参数，搭建 VISSIM 仿真平台，以效率和安全两个角度为指标进行秩序评价。结果表明，路幅板块增多和渗透率的升高利于城市道路路网的运行，机非物理隔离可有效保证路面车辆行驶的安全性。

关键词：机非交互；渗透率；跟驰模型；断面类型；秩序评价

中图分类号：U412　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671－1807(2024)10－0219－08

自动驾驶是百年汽车工业史上又一次伟大的范式转移，未来网联自动驾驶车辆(connected autonomous vehicle，CAV)一定会深入交通建设中，CAV 与人工驾驶车辆（human-driven vehicle，HV)混合行驶也会常态化，这将导致交通、道路等产业的规则秩序需要重新定义与评价。CAV 在路网中的渗透，会与人工驾驶车辆、行人以及非机动车等产生各种交互行为，很多学者基于对 CAV 的性能以及混入比例，探讨了各种交互行为下的模型，最终以路面仿真为指标进行评价。蒋阳升等[1]总结了国内外交通流在只能网联环境下的稳定性，通过经典模型和驾驶行为出发展望未来混合交通的发展前景。仵若玙等[2]通过分析行人、HV 与 CAV 的交互情况进行建模，对自动驾驶汽车的仿真开发和可靠性、安全性测试进行评价。王月娟[3]对自动驾驶和手动驾驶的混合交通流特性进行了研究，表明随着 CAV 比例的增加，能够显著提高合流交叉口车辆的通过率。Fengjiao 等[4]研究了不同道路中心线和道路信号下，CAV 与行人的交互过街行为情况，结果表明行人的过街行为与 CAV 的交互没有显著的关系。张建旭等[5]基于 Gipps 和元胞自动机模型构建了混合交通流的驾驶行为特征，以渗透率和事故预警区长度分析了交通流特征，发现随着渗透率升高，延误水平显著降低。Vu 等[6]研究了混合交通流中机非交互对风险公交驾驶行为的安全感知，认为公交突然的驾驶行为对司机感知为最危险。张林等[7]利用模拟仿真软件对 CAV 渗透路网的比例对交通效率的影响进行分析，发现简单路况下，交通效率与 HV 渗透率成正比；在复杂路况下，车流密度小时 CAV 的渗透率需要较大才能优化交通效率，车流密度大时 CAV 的增加反而使交通效率劣化。随着我国非机动车行业的飞速发展，非机动车道电动车辆的占比越来越高，因其提速快、体积小和操作简易等特点，导致其极易与车辆、行人发生碰撞，危险性较高，因此越来越多学者开始研究混合交通情况下机非交互的情形。倪颖等[8]针对交叉口机动车与非机动车交互的特点，解析了两者的动态多步交互特征，改进了社会力模型，为自动驾驶的拟人化驾驶提供模型；刘岩[9]对非机动车的干扰行为进行了总结统计，确定了新的模型，利用计算机视觉技术对机非交互行为进行了分析，最终对机非混行交通管控策略方面进行仿真和评价。Martin 等[10]提出可联邦学习框架在自动驾驶车辆中，可以计算优化交通流中中等交通的行程

收稿日期：2024-02-06

作者简介：陆昆敏(1999—)，女，云南文山人，硕士研究生，研究方向为道路、桥梁工程；通信作者庄一舟(1964—)，男，浙江奉化人，博士，教授，研究方向为道路、桥梁工程；詹小丽(1982—)，女，安徽池州人，博士，副教授，研究方向为道路工程；周子健(2000—)，男，浙江宁波人，硕士研究生，研究方向为道路、桥梁工程。

时间。Feng等[11]发现存在自行车道或硬路肩和虚线车道线的环境与车辆较少变换车道、远离自行车道或路肩行驶的行为显著相关，且当驾驶人先于自行车骑行人5 s分心，将导致约7.8%的超车行为，驾驶人使用手机会减少超越自行车过程中的变道行为。Gashaw等[12]基于电动自行车的运动特性，构建了动力二轮车与小汽车相互影响的交通流模型，对车辆之间的间隙分布特征、动力二轮车梯度渗透对小汽车和异质交通流特征的影响进行了研究。

上述学者在考虑机非交互或混合交通时都过于单一，并没有考虑断面的类型对交互情况造成的影响。21世纪以来，过去道路建设由于认识的局限，已不满足我国道路功能的需求，很多旧路进行横断面改造、拓宽路面、增设停车位等改扩建行为，因此各类横断面形式导致的机非交互情况对路面交通效率有较大的影响。朱筱琪等[13]利用建模软件讨论了车道占用度道路断面的通行能力的影响。Bella和Silvestri[14]通过模拟驾驶探究了双车道农村公路的三种横断面配置和几何线形因素对机非混行的影响。发现在直线路段上，不降速且侧向净空最小；在左转弯道上和右转弯道上可以观测到比直行路段上更大的侧向净空距离。陈荔等[15]利用多种模型探究了不同形态城市道路交通事故的发生原因。Yao等[16]基于车道数对混合交通流下的不同渗透率设计了不同的自动驾驶车辆专用车道。

因此考虑未来CAV逐渐渗透进入路网后，不同断面类型造成的机非交互区别下的秩序问题。通过综合考虑横断面类型、混合交通和机非交互场景，探究不同横断面类型特性而导致的两种机非交互场景的干扰下，车辆的多传感器监测系统能否高效安全的适应复杂多变、多因素影响下的城市道路，以交通流效率和安全性为指标进行秩序评价。以湖州市南浔泰安西路断面重建增设停车位为例，三种常见断面形式为基础，依据CAV与HV在不同横断面的驾驶行为基于遗传算法进行经典跟驰模型参数修正，利用修正后的参数搭建VISSIM仿真平台，综合考虑各渗透率下混合车流正常行驶的行程时间与机非交互下车辆延误的时间，利用机非交互下的CAV渗透路网后的行程时间作为指标评价交通流通行效率，后通过Tracker追踪软件对南浔路段摄取视频分析得到非机动车越线行驶行为次数，以增设路内停车位后机非交互的时间阈值TTC与临界安全冲突数判断冲突次数以评价车辆行驶的安全性。结合上述仿真结果，根据数据分析、评价CAV渗透路网后，断面类型造成机非交互后的交通效益和车辆行驶安全性，可为断面类型的选择和CAV的渗透与仿真参数提供参考。

1　工程背景

以南浔泰安西路改造为例，泰安西路是一条宽约32 m、一块板、双向四车道的次干路，道路两侧主要为商户区与住宅区，该道路承担着中心城区干路交通及东西向集散的重要任务。泰安西路现存问题较多，主要为：①道路为双向2车道，人车混行车辆停放秩序乱；②路段道路老旧，存在明显修补，交叉口处未进行展宽渠化，路口交通效率较低；③众多商铺门口人行道过宽存在空间浪费，甚至部分路段无人行道，有车辆停靠存在安全隐患；④人行道存在铺装破损严重、不均匀沉降等多种病害，同时无障碍设施不完善；⑤路内停车位布设过分占用非机动车道，致非机动车车道不连续，严重影响行人及非机动车通行。针对泰安西路目前现状，亟待改造计划为增加路内停车位，通过探究常见三种横断面类型下，非机动车与混合交通流产生交互行为时对路网的干扰情况。

城市道路断面的基本形式有三种，俗称为一块板、两块板和三块板。一般应该根据道路性质、等级，并考虑机动车、非机动车、行人的交通组织以及城市用地等具体条件，因地制宜地确定之，不应受这三种基本形式的限制。一块板是所有的车辆都在同一条车行道上双向行驶；两块板是由中间一条分隔带将车行道分为单向行驶的两条车行道，机动车与非机动车仍为混合行驶；三块板有两条分隔带，把车行道分成三部分，中间为机动车道，两旁机非物理隔离分为非机动车道。根据仿真模型的应用以及实际情况发现，三块板适用于道路红线宽度较大(45 m以上)、机动车辆较多(需要≥4条机动车道)、行车速度快以及非机动车多的主干道。一块板适用于道路红线较窄(40 m以下)、非机动车不多、设四条车道已经能够满足交通量需求的情况。两块板可以减少对向机动车之间的相互干扰，适用于双向交通量比较均匀而且车速较快的情况。因为三块板未完全分隔开对向车流，故仍存在对向车流的干扰问题。[17-20]

2　搭建仿真平台

选取利用微观仿真平台VISSIM采集参数进行评价，PTV-VISSIM是一种微观的、基于时间间隔和驾驶行为的仿真建模工具，用以城市交通和公共

交通运行的交通建模。它可以分析各种交通条件下,如车道设置、交通构成、交通信号、公交站点等,城市交通和公共交通的运行状况,是评价交通工程设计和城市规划方案的有效工具。在仿真过程中,由于经典跟驰模型分析驾驶参数时,在路段连续交通流场景中只与前、后车辆相互组偶,只考虑前、后方车辆影响,不考虑周边空间、驾驶人的心理-生理和混行交通等情况所产生的差别,并且经典参数的确定过于谨慎,不适用于 CAV 相对传统 HV 灵活驾驶的特性,无法达到预期效果与速度,因此需要对经典跟驰模型进行修正。如图 1 所示,未来混合交通流主要有 CAV 与 HV 组成,假设未设置 CAV 专用车道,两种车辆在交通流中随机分布。由于 CAV 配备了智能传感系统,能够获取道路与车辆信息,与传统车辆对比能够快速识别周边环境及时采取相应的加减速措施,汽车行驶过程中的交通运行有换道、间隙、跟驰三种状态。跟驰状态最为普遍,并直接影响道路的通行能力、行程时间与通行速度,因此需首先建立在不同横断面下的 HV 与 CAV 两种车辆的跟驰模型参数,以便后续 VISSIM 仿真中使用以突出混合交通流中 CAV 与 HV 的特性与区别[21-23]。

对四种传统跟驰模型进行对比分析,根据该跟驰模型是否考虑相对距离、相对速度、期望速度、连续时间、连续空间,当 $X=1$ 时表示考虑该特征,$X=0$ 表示不考虑该特征,得到对比结果如表 1 所示。由表 1 可知,IDM 跟驰模型较其他模型考虑更全面,其车辆预测轨迹与实际行驶轨迹更为接近,且 IDM 跟驰模型能充分考虑 CAV 与 HV 的短时频繁加减速运动状态,故选择反应特征较全面且预测准确性强的 IDM 车辆跟驰模型。根据 Treiber 提供的 IDM 跟驰模型确定初始仿真参数值为最大加速度 $\bar{a}_n=1.0\ \mathrm{m/s^2}$,车辆的期望速度 $v_n^d=33\ \mathrm{km/h}$,

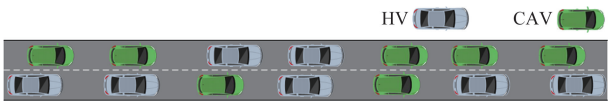

图 1　混合交通流路段车辆跟驰示意图

表 1　经典车辆跟驰模型特征

跟驰模型	创建人	相对距离	相对速度	期望速度	连续时间	连续空间
IDM	Treiber	1	1	1	1	1
OVM	Bando	1	0	0	1	1
Gipps	Gipps	1	0	1	0	1
Newell	Newell	0	0	0	0	1

安全时距 $\Delta t^*=1.5$ s,最适合的减速度 $a_n^{\mathrm{d}}=1.5\ \mathrm{m/s^2}$,最小安全车间距 $s_0=2.0$ s。

由于经典 IDM 跟驰模型在分析驾驶参数时,跟驰模型在路段连续交通流场景中只与前、后车辆相互组偶,只考虑前、后方车辆影响,不考虑周边空间、驾驶人的心理-生理和混行交通等情况所产生的差别,并且经典参数的确定过于谨慎,不适用于 CAV 相对传统 HV 灵活驾驶的特性,无法达到预期效果与速度。但因为 IDM 跟驰模型参数具有明确的物理含义,各种驾驶因素的改变都可以通过改变参数取值来进行表征,因此可以利用参数标定方法对典型 IDM 模型进行修正,首先建立分别适用于三种横断面下的 CAV 与 HV 对应的跟驰模型参数,多重因素耦合影响公式如下:

$$\Omega=\varphi(\boldsymbol{V}、T、S、C) \tag{1}$$

式中:Ω 为多重因素耦合影响下的参数;φ 为跟驰模型影响参数;$\boldsymbol{V}$ 为速度;T 为车辆属性(vehicle attribute);S 周边环境(surroundings);C 横断面形式。

遗传算法是通过模拟生物在自然环境适应性增强的一个不断更新过程,不断逼近最优解的方法,适用于对经典 IDM 下中 CAV 与 HV 的驾驶参数修正,因此利用遗传算法求解三种横断面下由于多重因素耦合影响的出行参数,主要操作如下所示。

第一步:输入 HV 与 CAV 在 IDM 下的跟驰模型参数,计算路段在 Ω 影响下的不同驾驶行为对应出行参数存入集合 S_{time} 中,$S_{\mathrm{time}}=\{t_{i^{(1)}j^{(1)}S^{(1)}},t_{i^{(2)}j^{(2)}S^{(2)}},\cdots,t_{i^{(n)}j^{(n)}S^{(n)}}\}$。

第二步:寻找 S_{time} 中 HV 驾驶条件下可满足 SCR 驾驶情况的出行参数标定 $i=1$,不满足 SCR 出行参数标定 $i=2$,筛选出行参数 $i=1$ 存入 $S_{\mathrm{time(i)}}^{\mathrm{HV}}$ 中,$i=2$ 输出为 0 存入 $S_{\mathrm{time}}^{\mathrm{HV}}$ 中,$S_{\mathrm{time}i}^{\mathrm{HV}}=\{t_{1^{(1)}j^{(1)}S^{(1)}},t_{1^{(2)}j^{(2)}S^{(2)}},0,\cdots,t_{1^{(n)}j^{(n)}S^{(n)}}\}$。

第三步:寻找 S_{time} 中 HV 驾驶条件下可满足 DCR 驾驶情况的出行参数标定 $j=1$,不满足 SCR 出行参数标定 $j=2$,筛选出行参数 $j=1$ 存入 $S_{\mathrm{time(j)}}^{\mathrm{HV}}$ 中,$j=2$ 输出为 0 存入 $S_{\mathrm{time}}^{\mathrm{HV}}$ 中。

第四步:同理输出 $S_{\mathrm{time}j}^{\mathrm{HV}}=\{t_{i^{(1)}1^{(1)}S^{(1)}},t_{i^{(2)}1^{(2)}S^{(2)}},0,\cdots,t_{i^{(n)}1^{(n)}S^{(n)}}\}S_{\mathrm{times}}^{\mathrm{HV}}$,以及 CAV 下各集合。

第五步:当集合中存在任意 i、j、$s=1$ 或 2 时,终止条件。

将上述流程最终所得行程时间集合与 CAV 与 HV 核定功率、道路设计速度等基础数据以及 IDM 跟驰模型的初始基础参数进行校正,得出不同横断

面校正后相应驾驶车辆平均跟驰参数如表2所示。发现紧急情况到车开始减速，目前已有无人车技术达到0.2 s，比人快了1 s，保守确定为0.4 s。输出反应时间 t_r，反应时间根据Lerner等[23]模拟试验确定中年人在专心驾驶时急刹车的反应时间为1.217 s，无人驾驶汽车通过车载传感系统识别道路环境，自动控制车辆安全行驶。

选取VISSIM仿真软件搭建CAV与HV混合环境下的三种不同断面的模型以收集行程时间，但跟驰模型参数无法直接用于VISSIM仿真条件，因此可利用VISSIM的COM接口与编程软件Python二次开发满足混合交通下混合驾驶环境，确定输入仿真基本参数为：①目标时段为城区晚高峰期路段，车型均基于小汽车对应内部车型1，CAV对应车色为红色，HV对应车色为蓝色；②CAV、HV均服从泊松分布；③设置三种横断面SCR、DCR、TCR，路段长度为1 km，单向双车道，向右行驶原则；④确定CAV与HV驾驶参数如表2所示，通行车辆数根据《城市道路设计规范》中给出的在不考虑非机动车与路内停车时，一条车道的理论通行能力在车速为30 km/h时为1 550 pcu/h，并根据《交通工程学》确定车道宽度修正系数 η 为1.2，一条车道通行车辆为1 800 pcu/h，仿真3 600 s。

3　交互场景分析

非机动车不论是自行车还是电动自行车，均是驾驶人直接暴露在交通环境中，与机动车相比更容易受到伤害。在非机动车道与机动车道未进行物理隔离的路段，非机动车越线违法占用机动车道行驶的现象十分常见，受路侧停车和车道宽度的制衡，非机动车常无视分隔线在多车道之间穿插。在这种情况下，机非之间的安全距离难以保证，车辆被迫采取变速、转弯甚至变道等动作以避免事故。此外，非机动车在靠近机动车的过程中也会导致HV驾驶人潜意识避让而改变原有行驶轨迹和速率。因此，非机动车无视横断面划线的机非交互在城区单向通行交通流中，一般有两种影响情况：一是越线行为导致车流产生减速、避让等行为导致的交通效率降低；二是越线行为导致机非交互产生冲突，对路面行驶产生安全性威胁。下述机非交互场景主要从交通效率与路面安全性进行分析评价。

3.1　交通效率评价

3.1.1　基础行程时间

研究非机动车越线行驶对交通效率的影响需首先对各断面下不同渗透率的基础行驶时间进行采集、分析。利用VISSIM仿真，将CAV在路网中的占比范围设定为0～100%，设置增量区间为20%，共五种混合方案。在路段上设置行程时间收集段，依据仿真结果收集文件得到各断面形式不同渗透率下的车辆基础行程时间，对数据进行统计如表3所示。

由表3各断面下随着渗透率变化的行程时间可知：

(1)当渗透比例确定时，行程时间与断面类型和驾驶形式有关，渗透率越小，横断面形式对于行程时间的影响越为明显。当CAV渗透率为0%时，三幅路对比单幅路行程时间减少了6.4%。当CAV渗透率为100%时，单幅路、双幅路、三幅路的行程时间差距很小。

(2)当横断面形式确定时，CAV的渗透比例越大，道路中车流行程时间越少，意味着等时间内车流平均流量越大，通行能力越强，以单幅路计算，100%对比0% CAV渗透率，行程时间减少了19.5%。

通过对不同渗透率下的混合交通流的平均行程时间进行收集，发现在未经机非交互影响下的路网中，随着CAV的渗透比例变大与横断面板块的增多，道路中车流行程时间减少，尤其在渗透率小于50%与单、双幅路之间。这是由于渗透率由25%升至50%时CAV逐渐成为交通流中的主流车辆，有效提升混行交通流时的交通效益，当渗透率大于50%时，HV车辆在路网中的影响逐渐减小，则渗透率50%为交通流影响强弱的临界值。单幅路与双幅路由于增加中央分隔带，行程时间差值明显大于双幅路与三幅路。

表2　IDM跟驰模型校正参数值

驾驶系统	断面类型	$\bar{a}_n$ /(m·s^{-2})	v_n^d /(km·h^{-1})	Δt^* /s	a_n^d /(m·s^{-2})	s_0 /m	t_r/s
HV	单幅路	1.33	31.3	1.6	−1.95	2.3	1.217
	双幅路	1.55	33.7	1.5	−1.87	2.2	
	三幅路	1.61	34.6	1.5	−1.79	2.1	
CAV	单幅路	1.36	33.9	1.4	−1.84	1.2	0.4
	双幅路	1.49	35.4	1.3	−1.77	1.1	
	三幅路	1.57	35.9	1.3	−1.70	1.0	

表 3　基础行程时间

断面类型	渗透率(0%)时间/s	渗透率(25%)时间/s	渗透率(50%)时间/s	渗透率(75%)时间/s	渗透率(100%)时间/s
单幅路	116.9	112.9	104.4	100.1	98.5
双幅路	111.5	107.9	102.1	98.6	97.8
三幅路	109.4	106.2	100.9	98.1	97.5

3.1.2　越线影响下行程时间

在交通效率的评价中,需考虑非机动车与机动车交互导致机动车行程时间的延误的影响,非机动车行驶时,因其体积小,起速快,且具有不规则性,驾驶人往往由于追求达到期望速度而产生超车、越线、并线等行为,此次南浔改造横断面设置路内停车位,导致非机动车需进行越线以避让机动车。越线过程由于非机动车占用机动车道导致机动车多次加、减速如图 2 所示,造成交通流驾驶时间延长,根据不同横断面形式影响交通流行时间较长。

非机动车辆越线超车时间速度如图 3 所示,目标车辆在 t_0 开始以 v_0 速度产生越线行为,加速后保持 v_1 速度继续行驶至 t_2 返回原车道,若越线路程超过图中 t_0 至 t_2 区间的路程,即代表非机动车继续占用机动车道行驶,由刘启远等[24]对非机动车越线超车行驶的研究表明非机动车越线生存概率为50%时对应时间取为 7 s,则最终确定非机动车在越线后继续行驶 64 m 视为占用机动车道行驶。结合实际工程南浔泰安西路截取的无交通信号灯典型非机动车道路段,采集高峰期 17:00—18:00 时间段的路段视频,利用 Tracker 追踪软件提取非机动车轨迹数据,最终提取的非机动车驾驶行为次数如表 4所示。

通过数据分析非机动车在不同板块下的驾驶动

图 2　非机动车越线过程

表 4　非机动车越线行驶次数

断面类型	越线数	返回非机动车道数	占用机动车道行驶数	返回车道比例/%
单幅路	157	124	38	75.80
双幅路	133	102	31	76.69
三幅路	0	0	33	/

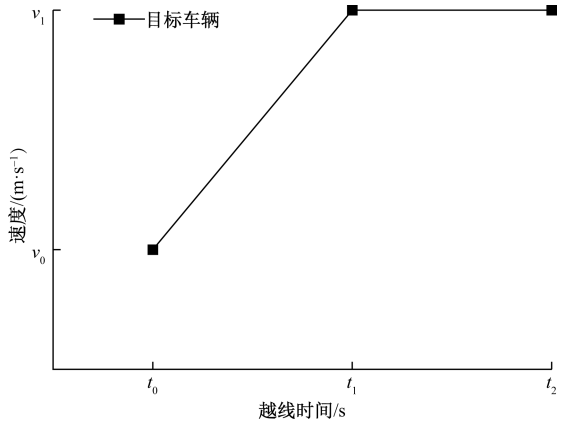

图 3　目标车辆越线超车时间速度

作次数总结发现,在高峰期统计时间内,共有 617 辆非机动车通行,其中电瓶车数量占比为 81.88%,非机动车在单幅路进行驾驶时,由于道路没有分隔带,机动车与非机动车都不受横向限制,导致驾驶人在追求期望速度下,更倾向于出现超车危险行为,甚至影响多辆机动车驾驶行为出现紧急避让、减速避让等行为;双幅路由于限制了机动车的横向限制,机动车驾驶相对密度较大,非机动车在选择超车时相对单幅道超车次数减少;三幅路由于分隔带限制了非机动车的一侧驾驶,不存在越线行驶,但仍然有部分车辆选择占用机动车道行驶。

非机动车在进行越线行驶时,会迫使机动车产生加减速的驾驶行为,确定非机动车对不同断面车辆的影响分析如下。

(1)影响次数:SCR 与 DCR 横断面由于没有物理分隔带,故非机动车越线行为对混合交通影响次数较多,DCR 较少,次数确定方法采用式(2),最终确定在设定 1 km 的路段下非机动车越线行驶 SCR 横断面车均经历 6 次非机动车影响,DCR 横断面车均经历 4 次非机动车影响,TCR 横断面车均经历 1 次非机动车影响。

$$N_{ri} = \varphi\left[\frac{T_0}{3\ 600/N_0}\Big/B_0\right] \tag{2}$$

式中:N_{ri} 为某断面车均影响次数;T_0 为某断面 0%渗透率对应初始行程时间;N_0 为某断面越线数;B_0 为某断面返回车道比例;φ 为影响修正次数,此处为 1。

(2)影响时间:在遇到非机动车越线行为时,假定 CAV 与 HV 均为匀减速+匀速+匀加速三个阶段行驶,由于 CAV 反应时间快,可提前进行加减速行为,能迅速达到原有期望速度。因此受非机动车影响小于 HV,通过相同路段所经过的时间也小,具体计算如式(3)所示,由式(3)确定非机动车对 HV

的影响时间为 3.25 s，对 CAV 的影响时间为 2.12 s，不同渗透率影响时间利用公式分别计算，确定 0%渗透率每次加减速影响时间确定 3.25 s，25%为 2.97 s，50%为 2.69 s，75%为 2.4 s，100%为 2.12 s。

$$\Delta t = \left(2\frac{v_1 - v_0}{a} + T_2\right) - \left(\frac{2\frac{v_1^2 - v_0^2}{2a} + v_1 T_2}{v_0}\right) \tag{3}$$

式中：Δt 为非机动车的影响时间；v_0 为车辆减速后的匀速度；v_1 为车辆初始匀速的速度；a 为车辆减速时的加速度；T_2 为减速后以匀速行驶的时间。

表 5　非机动车的影响时间

断面类型	渗透率（0%）时间/s	渗透率（25%）时间/s	渗透率（50%）时间/s	渗透率（75%）时间/s	渗透率（100%）时间/s
单幅路	19.5	17.82	16.14	14.40	12.72
双幅路	16.25	14.85	13.45	12.00	10.60
三幅路	3.25	2.97	2.69	2.40	2.12

由表 5 可知不同横断面各渗透率下非机动车的影响时间呈现线性关系，当 CAV 渗透率为 100%时，单幅路、双幅路、三幅路均可降低 34.8%非机动车的影响时间，影响时间随着渗透率的增加逐渐递减是由于自动驾驶的反应速度较人更快，且对环境，车辆的分析更为全面，通行更加流畅。在相同 CAV 渗透率下，三幅路的影响时间远小于单幅路、双幅路，这是由于横断面板块的增加限制了非机动车对机动车的干扰。

通过耦合各渗透率下的车辆行程时间以及机非交互对车流的影响时间，发现在经受非机动影响下的路网中，随着路幅板块增多和渗透率的升高，车辆行程时间与非机动车影响时间都减小，道路中车辆滞留时间越短，车流平均流量越大，道路通行能力显著提升，交通效率增大，有利于城市道路路网的运行。

3.2　路网安全性评价

南浔泰安西路改造最需要解决的现状问题是增加路内停车位，因此在确定横断面形式时还需考虑停车位的设立带来的一系列机非交互的影响，不同的横断面形式对路内停车区域行驶的路网车辆行驶安全性有不同的影响。通过预测交通冲突能够掌握交通流运行规律，因此利用 VISSIM 仿真对不同断面形式下非机动车与欲停车车辆的交互情况进行比较，CAV 在路网安全性影响中，选取对行程时间影响最大，能有效提升交通流效率的最优渗透率 50%。对机动车驶入驶离停车位时，可能与非机动车产生的交通冲突的区域路段进行视频截取，利用 Tracker 追踪软件对可能发生冲突的两模拟车辆定点输出坐标折线如图 4 所示，数据分析图中非机动车与机动车标定点坐标重合，意味着两车产生了冲突。

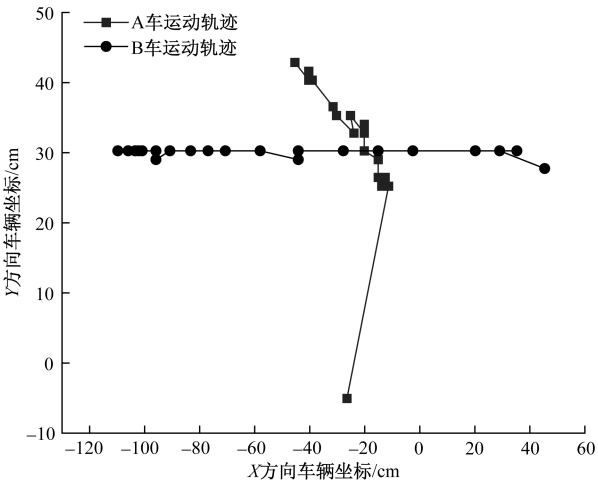

图 4　车辆轨迹识别

计算路内交通冲突的判别指标有距离、速度、时间判别指标，相比之下时间判别计算简单，更适用于 VISSIM 仿真研究，因此最终确定时间阈值 TTC 为交通冲突判别指标。标定模拟车辆的相对距离－时间曲线如图 5 所示，曲线最大斜率点是两车相对距离减小最快的点，对应最大行驶加速度，这点的时间到碰撞点的时间确定为发生追尾冲突的时间阈值 TTC，TTC 越大，则代表非机动车行驶越安全。在路况中确定最大加速度与方向继续行驶的情况下车辆不一定会发生追尾碰撞，因为两车辆即将交互时会采取紧急避险措施，两车可能会前后分别驶过交叉点。此时有两种情况，一是车辆安全通过；二是车辆因避险措施不及而产生变道冲突，变道冲突是在考虑车辆长宽后轨迹中一个点发生了重合。判断车辆是否产生变道冲突的方法是利用 Tracker 捕获 A、B 两车避险措施下的时刻速度分别记为 V_A、V_B，两车长度为 L_A、L_B，距离预计碰撞点的距离为 S_A、S_B，时间阈值为 TTC_A、TTC_B，两车状态将出现下述 a、b 两种情况。

$TTC_A \geqslant TTC_B$：若 $TTC_A \leqslant TTC_B + \frac{L_B}{V_B}$，则冲突有效且最终 $TTC = TTC_A$，否则冲突无效；

(b) $TTC_A < TTC_B$、若 $TTC_B \leqslant TTC_A + \frac{L_A}{V_A}$，则

冲突有效且最终 $TTC=TTC_B$，否则冲突无效。

根据时间阈值判定指标方法计算冲突数，得到冲突判别指标时间阈值 TTC 与累计冲突频率曲线如图 5 所示，根据安全等级划分法对冲突数、进行分析、整合、计算，确定对非机动车行驶的相对临界安全冲突数。

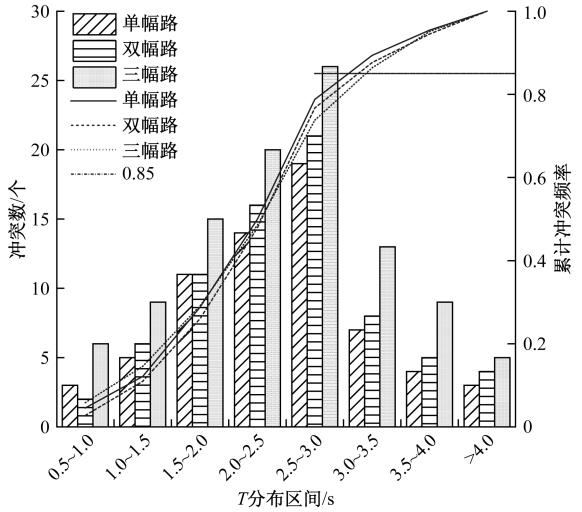

图 5　冲突在不同时间阈值区段的分布

根据帕累托曲线，确定累计冲突频率 0.85 处对应时间阈值 TTC 为临界值，则据图 6 可知单幅路、双幅路、三幅路累计冲突频率为 0.85 时对应 TTC 为 3.06 s、3.11 s、3.19 s；参照相关文献的安全等级划分法[25]，累计冲突频率 0.85 处阈值对应的冲突数（设为 K）确定为临界安全冲突数，可知单幅路、双幅路、三幅路对应临界安全冲突数为 7、8、13，将停车区域处的非机动车在交互时是否相对安全看作因变量，分别用 $X=0$ 与 $X=1$ 进行表示，当冲突数小于 K 时，表示非机动车在停车区域内的行驶相对安全，即 $X=0$，反之则不安全，即 $X=1$，确定三种断面形式下的安全等级划分如表 6 所示。

综上所述，当 CAV 渗透率为 50%时，非机动车在路内停车区域行驶是否安全，结合累计冲突频率 85%处所对应冲突指标时间阈值与冲突数进行比较，发现三种停车位模式下发生冲突的时间阈值 T 都处在 3～3.5 s，三幅路最大，与最小单幅路差值为 0.13 s。与对应的相对临界安全冲突数进行比较，发现三种停车模式下单幅路临界冲突安全数最小，三幅路最大，意味着在控制路段其他所有变量的情况下，不同横断面形式在同样比例的交通累计冲突车辆中，三幅路能发生冲突的容忍车辆最多，相对非机动车行驶最安全，双幅路次之，单幅路最危险。

表 6　各停车模式下安全等级划分

横断面形式	相对安全（$X=0$）	相对不安全（$X=1$）
单幅路	$0\leqslant K\leqslant 7$	$7<K$
双幅路	$0\leqslant K\leqslant 8$	$8<K$
三幅路	$0\leqslant K\leqslant 13$	$13<K$

4　结论

本文对 IDM 跟驰模型初始参数利用遗传算法耦合不同断面形式下各因素的影响，得到校正后的参数并用于 VISSIM 仿真，综合得到非机动车越线行驶后对机动车流的影响时间，耦合机动车在路网中行程时间与影响时间以评价交通效率。利用时间阈值作为指标考虑横断面形式的不同在增设停车位时机非交互对路网车辆驾驶的安全性评价。最终得到结论如下：随着路幅板块增多和渗透率的升高，车辆行程时间与非机动车影响时间都减小，道路中车辆滞留时间越短，车流平均流量越大，道路通行能力显著提升，交通效率增大，有利于城市道路路网的运行，对有非机动车参与的交通路段最安全。

存在的问题如下：由于无人驾驶技术仍然在实验阶段，缺乏一定规模的实际道路行驶数据，不能准确地得到行驶参数。随着无人驾驶的深入与拓展探究，未来能获取更准确的数据来描述无人驾驶车辆的行为特性。另外，该研究主要针对了直行车辆问题，未考虑信号交叉口处车辆的速度控制与横向碰撞问题，下一步可以对车辆的直行，左右转弯等车辆控制进行研究。

参考文献

[1]　蒋阳升，顾秋凡，姚志洪. 智能网联混合交通流稳定性解析方法综述[J]. 西南交通大学学报，2022(5)：927-940.

[2]　仵若玙，杨德真，任羿，等. 人-车-智共享道路空间行人安全行为建模方法[J/OL]. 北京航空航天大学学报：1-10[2023-12-11]. https：//doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0370.

[3]　王月娟. 自动驾驶与手动驾驶的混合交通流特性研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2023.

[4]　FENGJIAO Z，JENNIFER O，WEIMIN J，et al. Pedestrian behavior interacting with autonomous vehicles during unmarked midblock multilane crossings：role of infrastructure design，AV operations and signaling[J]. Transportation Research Part F：Psychology and Behaviour，2024，100：84-100.

[5]　张建旭，胡帅，金宏意. 人机混驾交通流事故预警换道决策及特性分析[J]. 公路交通科技，2023，40(11)：212-221.

[6] VU V H, NGUYEN H T, HISASHI K. Effects of risky bus driving behaviors on motorcyclists' and car drivers' traffic safety perceptions in mixed traffic flow[J]. Traffic Injury Prevention, 2023, 76: 1-9.

[7] 张林，刘鑫，崔飞，等. 混合交通流中自动驾驶车辆比例对交通效率的影响[J]. 河南科技，2022，41(9)：14-18.

[8] 倪颖，辛榴燕，龙柯宇. 机非交互的交叉口右转机动车行为建模与仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2019，47(7)：994-1003.

[9] 刘岩. 机非混行交通安全建模与管控方法仿真及评价[D]. 南京：东南大学，2022.

[10] MARTIN G, FILIP V, EDOUARD I. Impact of federated deep learning on vehicle-based speed control in mixed traffic flows[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2024, 186:186104812.

[11] FENG F, BAO S, HAMPSHIREA R C, et al. Drivers overtaking bicyclists: an examination using naturalistic driving data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 115: 98-109.

[12] GASHAWA S, GOATINB P, HARRI J. Modeling and analysis of mixed flow of cars and powered two wheelers[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 89: 148-167.

[13] 朱筱琪，张浩宇，张杨柳，等. 探究车道被占用对城市道路通行能力的影响[J]. 科技和产业，2014，14(4)：127-130.

[14] BELLA F, SILVESTRI M. Interaction driver-bicyclist on rural roads: effects of cross-sections and road geometric elements[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 102: 191-201.

[15] 陈荔，李聪颖，詹立，等. 城市道路交通事故形态影响因素分析与预测[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2022，42(4)：98-107.

[16] YAO Z, LI L, LIAO W, et al. Optimal lane management policy for connected automated vehicles in mixed traffic flow[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2024, 637: 637129520.

[17] 郝伟，樊恒辉. 堤防道路横断面设计研究[J]. 中国农村水利水电，2017(12)：209-211.

[18] GARGOUM S A, KARIM B E, KENNETH F, et al. A fully automated approach to extract and assess road cross sections from mobile LiDAR data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(11): 3507-3516.

[19] 刘丽芬，武贤慧. 基于改进层次分析法的城市道路横断面评价方法[J]. 公路交通科技，2016，33(11)：50-56.

[20] KIEC M, TRACZ M, GACAS. Design of cross-section on roads through built-up areas[J]. Archives of Civil Engineering, 2012(3): 243-257.

[21] 李文礼，韩迪，任勇鹏，等. 基于交互车辆轨迹预测的自动驾驶车辆轨迹规划[J]. 计算机应用研究，2023，40(2)：519-525.

[22] 昝雨尧，王翔，王可馨，等. 考虑驾驶人交通环境感知的车辆安全势场及跟驰行为建模[J/OL]. 山东科学：1-10[2024-03-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1188.N.20240228.1250.014.html.

[23] 沈鑫，罗程，闫莉莉，等. 信号交叉口跟驰模型及其参数标定研究[J/OL]. 控制工程：1-10[2024-03-05]. https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220083.

[24] LERNER N D, HUEY R, WMCGEE H W, et al. Older driver perception-reaction time for intersection sight distance and object detection[J]. Gap Acceptance, 1995(1): 33-40.

[25] 刘启远，孙剑，田野，等. 机非交互路段非机动车越线超车行为建模与仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2019，47(11)：1585-1592.

Evaluation of Machine-Non-Interactive Order Based on Mixed Traffic: Taking Taian West Road in Nanxun as an Example

LU Kunmin, ZHUANG Yizhou, ZHAN Xiaoli, ZHOU Zijian

(College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the infiltration of Connected Autonomous Vehicle (CAV) into the road network, the order evaluation was carried out on the different disturbance of traffic flow caused by different section types of machine-non-interaction situations. Taking Taian West Road in Nanxun as an example, the CAV penetration ratio was introduced, and the traffic flow data at peak times were statistically analyzed in combination with the different interaction situations caused by the section characteristics. A genetic algorithm was proposed to correct the simulation parameters of CAV following model, and a VISSIM simulation platform was built to evaluate the order from two perspectives of efficiency and safety. The results show that the increase of road width and permeability is beneficial to the operation of urban road network, and the non-physical isolation can effectively ensure the safety of road vehicles.

Keywords: machine non-interaction; permeability; following model; section type; order evaluation