

单车道横向阻断场景交通流建模及仿真误差分析

涂彭越, 白玉

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对间断流建模影响因素多、仿真随机性大的特点, 提出了一种考虑横向阻断的障碍泛化形式交通流模型。通过将经典智能驾驶模型(IDM)拓展为静态避障形式(IDM+)并引入车辆预决策控制流程(Pre-IDM+), 搭建交通完全随机加载的间断流仿真平台, 以单车道行人穿越场景为例对运行轨迹、交通流特征、车辆控制状态3类交通分析指标的随机收敛性和仿真步长敏感度进行定量讨论。结果表明: 200 仿真样次能较好兼顾模型精度和分析效率(平均误差 $<2\%$), 仿真步长改变主要对车辆停车及避障控制相关指标产生明显影响(最高误差 43%)。在指标可靠度方面, 平均速度、减速度均值、控制状态切换频次以及自由/跟驰状态时间占比具有较好的评估一致性, 随机误差和仿真步长的影响均 $<1\%$ 。

关键词: 交通工程; 间断流; 横向阻断; 交通评估指标; 仿真误差; 仿真样次; 仿真步长

中图分类号: TP391.9; U491

文献标志码: A

Modeling and Simulation Error Analysis on Single-lane Traffic Flow Considering Transverse Blocking

TU Pengyue, BAI Yu

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The intermitted traffic flow modeling needs to take many impact factors into consideration and usually suffer large randomness in traffic simulation analysis. In response, this paper presents a traffic flow model with generalized obstacle form which includes transverse traffic blocking and its interference into modeling. By extending the IDM car-following model to obstacle avoidance cases (IDM+) and simultaneously introducing a vehicle pre-decision control workflow (Pre-IDM+), an intermitted traffic flow simulation platform under totally

random traffic loading is built. Based on the platform, the random convergence and simulation updated time step sensitivity of traffic indexes on driving trajectory, traffic flow characteristics and vehicle control state are discussed quantitatively in a single-lane pedestrian crossing scenario. The results show that the simulation accuracy and analysis efficiency can be balanced (average error $<2\%$) by setting 200 of simulation sample size, and the change of simulation updated time step has significant impact on parking times and obstacle avoidance (maximum error up to 43%). From the perspective of index reliability, the average speed, the average deceleration, the frequency of driving state switching, and the time proportion of free/following driving state perform a good evaluation consistency (random error and simulation updated time step impact both $<1\%$).

Keywords: traffic engineering; intermitted traffic flow; transverse traffic blocking; traffic evaluation index; simulation error; simulation sample size; simulation updated time step

受行人过街、信号灯、沿线进出口的影响, 间断流横向交通阻断频繁、车流运行特征复杂, 传统交通模型较难对其进行一般化分析刻画。一方面, 构建车辆与路外交通对象的交互模型相对困难, 当道路场景较为复杂时较难兼顾建模精度和分析效率; 另一方面, 由于间断流运行状态波动大, 基于随机种子抽样估计交通流运行参数的传统分析方法有效性下降, 因此使得不同交通分析指标在模型中的误差水平难以被衡量。然而, 随着精细化交通设计和智能驾驶技术的快速发展, 城市道路间断流已成为当前交通运行机理解析和车辆运行控制优化的关键场景。横向阻断作为间断流交通的重要运行特征, 有

收稿日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(52272320)

第一作者: 涂彭越, 博士生, 主要研究方向为交通流建模、交通仿真、交通适驾性。E-mail: tupengyue@163.com

通信作者: 白玉, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通设计、道路通行能力、交通冲突与安全等。

E-mail: baiyu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

必要对其相关建模方法及分析误差进行讨论。

现有研究涉及横向交通阻断的建模方法主要有元胞自动机(CA模型)和物理运动学模型。CA模型具有较好的运算效率,多用于复杂交通交互场景的建模,如:在路段行人过街场景中基于固定距离^[1]、冲突时间差^[2]构建动态让行率模型,以及考虑交通冲突特征和行人速度阈值等^[3]描述不同人车让行规则;在混行交通建模中,CA模型也被用于刻画行人^[4]和非机动车^[5]侧向干扰、路段停车影响^[6]以及交叉口内部机非冲突交互^[7]等。CA模型在描述道路空间交通分布和密度演变时具有独特优势,但时空离散化处理也使其较难用于高阶运动学参数(如加速度、慢度等)和具体交通交互行为的建模。

物理运动学模型能给出具体车辆控制公式并输出完整的交通轨迹。相比于CA模型,物理运动学模型形式一般较为复杂但刻画精度较高,更适用于具体交互行为和单一冲突点流线的建模。赵靖等通过拓展全速度差模型^[8]刻画行人穿越影响下的车辆纵向运动过程,并使用实测数据分别构建车让人^[9]和人让车^[10]双向让行logit决策模型,最后搭建路段车流仿真分析模型^[11]对不同交通流量下的车辆通行延误和行人等待时间进行讨论。近年来,随着多智能体交通仿真技术和相关底层模型快速迭代,部分学者面向混行交通背景先后构建了非机动车越线超车行为模型^[12]、交叉口右转机动车穿越模型^[13]和共享空间混合通行模型^[14]等。上述研究虽然针对特定交通场景给出了具体建模方法,但是在模型分析效率、泛化性以及仿真可靠度方面仍需进一步验证和优化。

除了模型构建本身,模型参数取值以及仿真样本量和采样频率(仿真样次和步长)也是影响间断流模型精度的重要因素。现有研究对仿真误差的相关讨论集中在参数标定和流程优化方面,主要涉及目标函数构建^[15]、标定效率提高^[16]以及标定框架设计^[17]等。此外,也有研究针对标定结果多解问题利用分散度聚类^[18]、信息熵等^[19]进行多参数组合,并基于车联网背景^[20]、交通状态连续演化特征^[21]对经典交通仿真软件(如VISSIM)进行二次开发和模型拓展等。上述研究虽然对误差优化实操方法进行了一定归纳,但是较少定量讨论仿真样次、步长对模型精度的潜在影响。

面向交通建模和仿真误差问题,在智能驾驶模型(IDM)基础上提出了一种考虑横向交通阻断影响的间断流一般建模方法(Pre-IDM+),并利用实测交通数据进行了模型标定,最后搭建了仿真平台。

对比传统冲突交互模型,通过构建虚拟障碍泛化不同交通对象对道路车流的阻断干扰,兼顾了模型精度和计算效率。在仿真平台构建方面,考虑了交通随机到发(非随机种子)对仿真结果的误差影响并通过引入车辆预决策控制流程降低了仿真碰撞错误。在此基础上,以单车道路段行人穿越场景为例,分别从仿真样次和步长2个维度探究不同交通分析指标在仿真系统中的误差水平。

1 交通流模型构建

1.1 车辆跟驰模型

横向阻断影响下交通运行状态复杂,交通流模型除了要刻画车辆基本跟驰行为外,还要兼容车辆减速避障、停车等待、启动加速等多种驾驶运行工况的连续模拟。对比筛选主流微观交通模型,选择IDM作为基准运动学模型,并对模型结构和参数进行适当改进以提高泛化能力^[22]。IDM结构形式为:

$$\frac{dv}{dt} = a_{\text{exp}} \left[1 - \left(\frac{v}{v_f} \right)^4 - \left(\frac{s_{\text{exp}}}{s} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$s_{\text{exp}} = s_0 + t_{\text{safe}} v + \frac{v \Delta v}{2 \sqrt{a_{\text{exp}} b}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: dv/dt 为车辆决策加速度(模型输出); a_{exp} 为车辆期望加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; v 为车辆当前车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_f 为车辆自由流速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; s 为车辆与前车的距离, m ; s_{exp} 为车辆与前车期望保持的距离; s_0 为静止安全距离, m ; t_{safe} 为动态跟驰时距, s ; Δv 为车辆与前车的相对速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; b 为舒适减速度阈值, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

该模型在间断流分析中主要有以下优势:①兼容性强且控制连续,能够适用车辆跟驰、避障等多种工况^[23]及相互切换过程的运动模拟;②受控车辆对于前方目标具有“完全避障”特性^[24],能有效降低随机阻断场景的仿真碰撞报错率;③模型参数物理含义明晰、可解释性强^[25],有利于仿真结果的一致性评估和误差对比分析。

1.2 横向阻断影响建模

通过在道路中产生虚拟障碍的形式来一般化描述不同横向交通阻断事件对道路车流的影响。对于每个虚拟障碍,交通阻断影响可用 $G(p_0, t_0, t_d)$ 表示。其中, p_0 为阻断位置, t_0 为阻断开始时刻, t_d 为阻断持续时间。对于 t 时刻处于道路位置 p 的车辆($p < p_0$),若前方存在交通阻断 $G(p_0, t_0, t_d)$ 且满足 $t_0 \leq t \leq t_0 + t_d$,则车辆须减速避让前方虚拟障

碍并以下式进行纵向控制:

$$\frac{dv}{dt} = a_{\text{exp}} \left[1 - \left(\frac{s_0 + t_{\text{safe}} v + v^2 / 2 \sqrt{a_{\text{exp}} b}}{s} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, $s = p_0 - p$ 为车辆与阻断点的距离。式(3)可视为 IDM 的静态避障拓展改进形式 (IDM+), 相比于标准跟驰形式 IDM, IDM+ 去掉了自由流速度项 $(v/v_f)^4$, 避免因该项与常数项 1 抵消而导致车辆避障时出现加速度突变等控制不连续问题。IDM+ 能显著提高车辆应对突发交通阻断事件的减速平顺性, 使得模型输出更符合真实交通轨迹。IDM+ 控制下的交通流特征可类比部分连续流研究中^[24-27]针对自动驾驶混合流交通的优化控制方法, 这里不再详细论述。所有车辆将根据运行工况执行不同纵向控制模型, 当前方存在多个运动目标或多种障碍类型时, 车辆将分别进行控制决策并使用最小加速度输出结果, 以保证运行安全。

1.3 预决策避障控制

IDM+ 虽然继承了标准 IDM 的“完全避撞”特性, 但是受物理最小制动加速度限制 ($-8 \sim -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), 其输出结果并不总能被车辆控制系统严格执行。间断流仿真中各类交通阻断事件发生位置和时刻随机, 当障碍加载点距离上游运行车辆过近时, 受阻车辆就极易出现紧急制动或因来不及减速而发生碰撞错误 (发生概率远高于现实水平)。为了消除上述碰撞错误对交通流仿真分析的误差影响, 在 IDM+ 基础上, 进一步引入预决策控制流程 (Pre-IDM+) 来模拟实际道路中车辆提前避让横向阻断障碍的交互反应过程, 如图 1 所示。

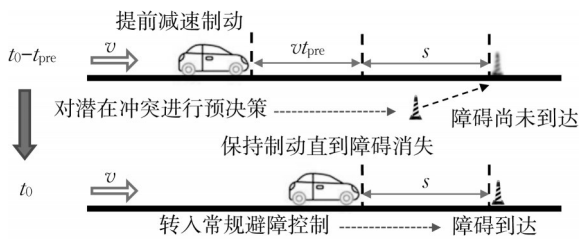


图 1 Pre-IDM+ 预决策控制下车辆减速过程

Fig.1 Slow down process of the vehicle under Pre-IDM+ control

具体方法为: 在障碍交互模型中增加时间参数 t_{pre} 来刻画车辆对潜在交通冲突的预判反应能力, 其值可根据实际交通数据观测或车辆控制水平要求具体设定。仿真时刻 $t (t < t_0)$ 下车辆对前方交通阻断事件 $G(p_0, t_0, t_d)$ 的预测控制流程如图 2 所示。其

中, $\tau = t_0 - t$ 为前方障碍即将侵入道路的剩余时间, 通过预估 τ 实现对前方冲突状况的预判, 从而对是否在障碍侵入道路前采取减速制动进行决策。

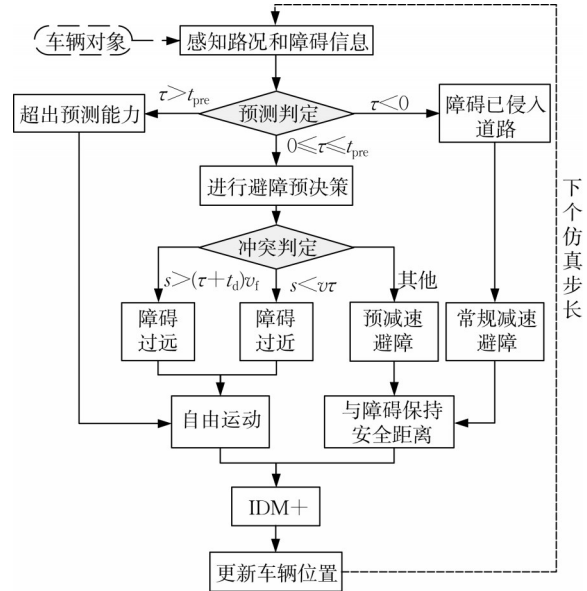


图 2 Pre-IDM+ 预决策控制流程

Fig.2 Pre-IDM+ control workflow

2 模型实现与应用

2.1 基准分析场景

单车道障碍穿越情形最能直观反映车流受横向交通阻断影响的基本运行特征规律, 选取其作为本文模型应用和仿真误差分析的案例场景。为了方便描述, 以路段行人过街场景具象化障碍穿越情形, 构建仿真分析道路场景, 如图 3 所示。设置 300 m 单车道路段并在 $p_0 = 150 \text{ m}$ 处设置行人过街点。过街点采用无信号控制模式, 路段车辆严格让行过街行人, 按步速 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 估算每个过街行人对车道的阻断时间为 3 s ($t_d = 3 \text{ s}$)。为了保证仿真输出结果的一般性, 路段上游车辆和过街行人均以泊松分布随机加载进入道路, 路段车辆流量为 $300 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$, 过街行人流量为 $400 \text{ ped} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

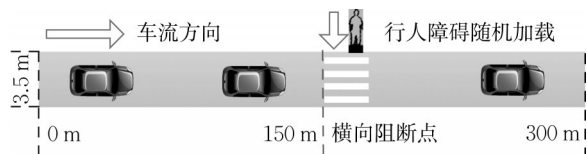


图 3 路段行人过街场景

Fig.3 Pedestrian road-crossing scenario

2.2 模型参数标定

使用实测交通数据对 Pre-IDM+ 相关参数进行

标定。考虑到新型混合流交通发展背景和模型潜在应用分析需求,采用新加坡国立大学某路段人行横道2019年6月至2020年3月监控视频数据,如图4a所示。该视频同时包含传统人工驾驶车辆和无人驾驶实验车通过人行横道的交通运行数据,能实现异质车流运行特征的对比观测,更有利于合理确定模型参数取值范围,从而提高标定结果的普适性。使用辅助处理软件George人工提取车辆通过观测路段的运行轨迹,如图4b~d所示。最终筛选得到368

条覆盖不同驾驶工况的样本轨迹数据(见表1),用于模型标定。

表1 模型标定轨迹分布

Tab.1 Distribution of trajectory for model calibration

车辆类型	各场景下样本车辆数			小计
	自由通过	跟驰前车	减速或停车让行	
人工驾驶车辆	29	165	120	314
无人驾驶小巴	27	8	19	54
小计	56	173	139	368



a 标定视频观测视角

全局时间戳	横向位置	纵向位置	横向速度	纵向速度	横向加速度	纵向加速度	速度	加速度	总位移	转角速度
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
GlobalTime	X[m]	Y[m]	Vx[m/s]	Vy[m/s]	Ax[m/s ²]	Ay[m/s ²]	Speed[m/h]	Acceleration[m/s ²]	Space[m]	Curvature[1/m]
1	52534	1.58	-46.18	-0.09	7.86	0	0.01	28.29	0.01	0
2	52535	1.58	-46.39	-0.09	7.86	0	0.02	28.3	0.02	0.79
3	52536	1.57	-44.6	-0.08	7.86	0.01	0.02	28.3	0.02	1.57
4	52537	1.56	-43.82	-0.08	7.86	0.01	0.03	28.31	0.03	2.36
5	52538	1.55	-43.03	-0.08	7.87	0.01	0.04	28.32	0.04	3.14
6	52539	1.54	-42.24	-0.08	7.87	0.01	0.05	28.34	0.05	3.93
7	52540	1.53	-41.46	-0.08	7.88	0.01	0.06	28.36	0.06	4.72
8	52541	1.53	-40.67	-0.08	7.88	0.01	0.08	28.38	0.08	5.51
9	52542	1.52	-39.88	-0.08	7.89	0.02	0.09	28.41	0.09	6.32
10	52543	1.51	-39.09	-0.08	7.9	0.02	0.11	28.45	0.11	7.09
11	52544	1.5	-38.3	-0.08	7.91	0.02	0.13	28.49	0.13	7.88
12	52545	1.5	-37.51	-0.07	7.93	0.02	0.14	28.54	0.14	8.67
13	52546	1.49	-36.71	-0.07	7.94	0.03	0.15	28.59	0.15	9.46
14	52547	1.48	-35.92	-0.07	7.96	0.03	0.16	28.65	0.16	10.26
15	52548	1.47	-35.12	-0.07	7.97	0.03	0.16	28.7	0.16	11.05
16	52549	1.47	-34.32	-0.06	7.99	0.03	0.16	28.76	0.16	11.85
17	52550	1.46	-33.52	-0.06	8	0.03	0.15	28.82	0.15	12.65
18	52551	1.46	-32.72	-0.06	8.02	0.03	0.13	28.87	0.13	13.45
19	52552	1.45	-31.92	-0.05	8.03	0.03	0.11	28.91	0.11	14.26
20	52553	1.45	-31.12	-0.05	8.04	0.03	0.08	28.95	0.08	15.06
21	52554	1.44	-30.31	-0.05	8.05	0.03	0.06	28.98	0.06	15.86
22	52555	1.44	-29.51	-0.04	8.05	0.03	0.03	28.99	0.03	16.67
23	52556	1.43	-28.7	-0.04	8.05	0.03	0	29	-0.01	17.47
24	52557	1.43	-27.9	-0.04	8.05	0.03	-0.04	28.99	-0.04	18.28
25	52557	1.43	-27.9	-0.04	8.05	0.03	-0.04	28.99	-0.04	18.28

b George轨迹提取界面

c 轨迹数据提取结果示例

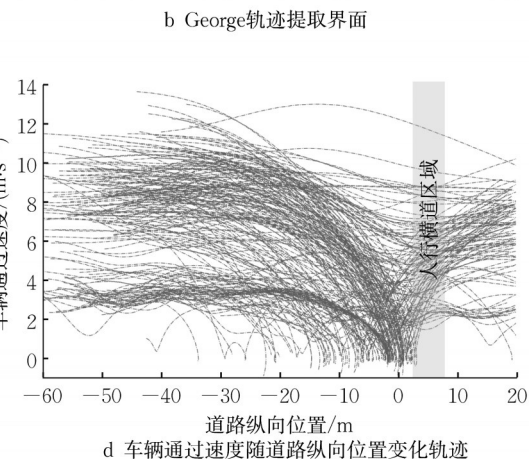


图4 车辆运行轨迹数据提取

Fig.4 Trajectory data extraction of vehicles passing through the road

标定中,首先通过观测车辆减速时刻与行人侵入车道时刻的时间差确定参数 t_{pre} ,然后通过最小化模型输出轨迹和真实轨迹的加速度均方差 $e_{MSE,a} = \frac{1}{T} \sum (a_i - \hat{a}_i)$, $i \in T$, T 为轨迹观测周期。速度均方差 $e_{MSE,v}$ 和距离均方差 $e_{MSE,s}$ 计算方法相同。最后,遍历确定最优 a_{exp} 和 t_{safe} 取值组合。汇总得到的模型参数标定结果见表2,标定后模型输出结果和真实轨迹如图5所示。

对比了不同场景下各控制模型轨迹拟合误差,如表3所示。标准IDM仅在传统跟驰场景适用;将标准IDM直接嵌套预决策控制框架能够实现基本阻断场景的描述建模(Pre-IDM);对标准IDM进行

表2 间断流场景Pre-IDM+参数标定结果

Tab.2 Calibration results of Pre-IDM+ parameters under intermitted traffic flow condition

参数	模型取值
期望加速度*, $a_{exp}/(m \cdot s^{-2})$	1.17
舒适减速度阈值, $b/(m \cdot s^{-2})$	2.0
静止安全距离, s_0/m	2.0
动态跟驰时距*, t_{safe}/s	1.62
自由流速度, $v_f/(m \cdot s^{-1})$	10
障碍预测时间*, t_{pre}/s	2.0
最小制动加速度, $a_{min}/(m \cdot s^{-2})$	-8

注: *为模型核心影响参数,由实测数据标定得到。

静态避障形式改进(IDM+),并结合预决策控制框架则得到本文使用的间断流模型(Pre-IDM+)。对比结果显示:Pre-IDM相比于标准IDM在跟驰场景

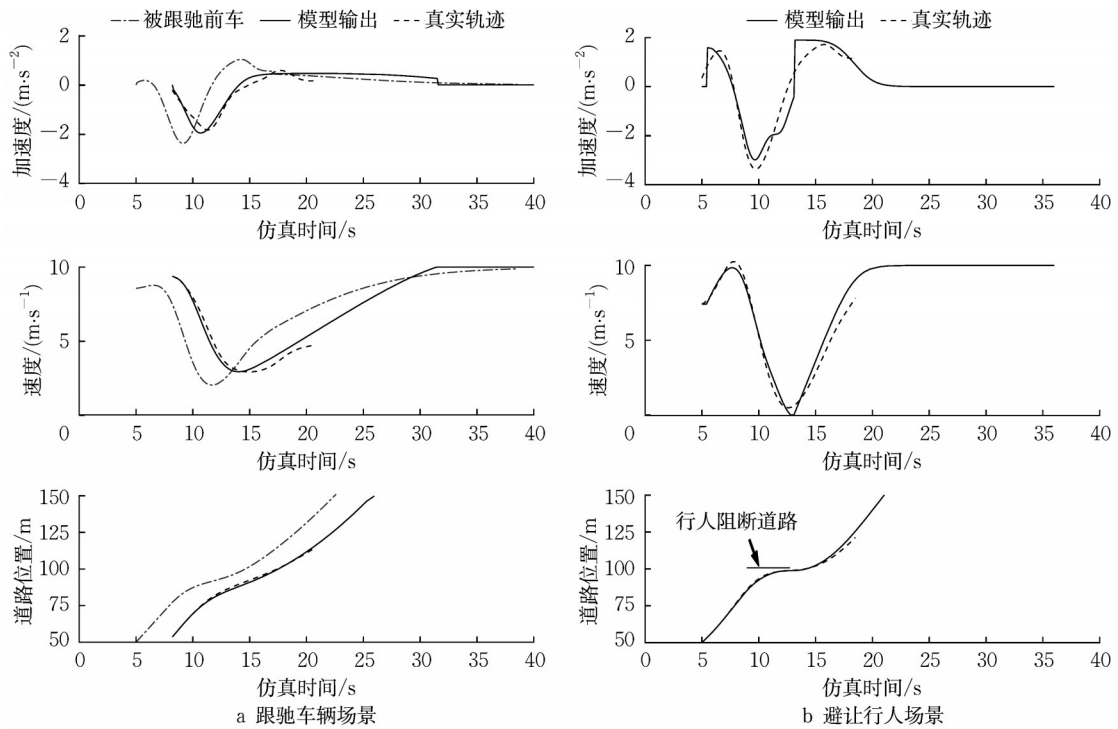


图 5 标定后模型输出结果和真实轨迹

Fig.5 Output trajectories after calibration and real trajectories

的误差水平基本相当,而 Pre-IDM+ 在各交通场景下的位移、速度、加速度误差表现均优于 Pre-IDM 和

标准 IDM,证明了 Pre-IDM+ 的有效性和改进效果。

表 3 不同控制模型轨迹拟合误差

Tab.3 Trajectory fitting error of different control models

模型形式	跟驰场景			横向阻断场景			全场景纵向控制		
	$e_{MSE,s}$	$e_{MSE,v}$	$e_{MSE,a}$	$e_{MSE,s}$	$e_{MSE,v}$	$e_{MSE,a}$	$e_{MSE,s}$	$e_{MSE,v}$	$e_{MSE,a}$
标准 IDM	1.349 2	0.176 9	0.058 9						
Pre-IDM	1.288 7	0.213 5	0.056 2	3.790 8	0.498 0	0.301 9	2.438 2	0.320 1	0.167 2
Pre-IDM+	0.607 9	0.072 0	0.047 9	2.442 5	0.247 6	0.238 9	1.426 2	0.150 3	0.133 1

注: $e_{MSE,s}$ 、 $e_{MSE,v}$ 、 $e_{MSE,a}$ 单位分别为 m、 $m \cdot s^{-1}$ 、 $m \cdot s^{-2}$ 。

2.3 仿真平台构建

使用 Python 搭建间断流仿真平台,对给出的间断流建模方法进行加载测试。平台功能模块包括交通生成、车辆控制、交通轨迹提取和数据处理等,仿真控制流程如图 6 所示。相比传统微观交通仿真软件(如 VISSIM、SUMO 等),间断流仿真平台采用了完全随机的交通加载形式(非随机种子),能更好地对交通随机冲突交互和车流离散过程进行一般性刻画。同时,通过引入预决策避障控制流程,改善了传统模型因缺乏考虑车辆路段预判以及提前减速行为而产生不合理紧急制动或仿真碰撞错误的问题。

仿真平台输出为每个仿真步长下车辆在路段中的运行轨迹及控制状态。以路段行人过街场景为例,绘制 300 s 内路段中车辆位置、速度及加速度随

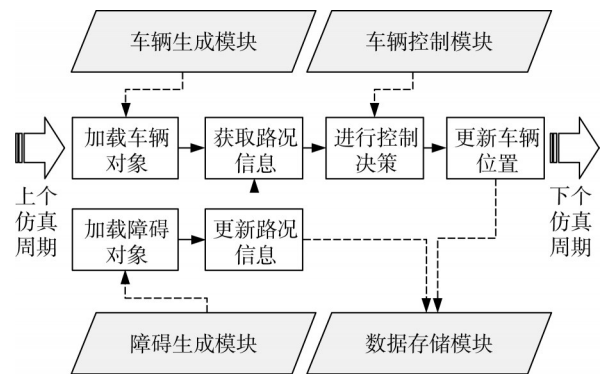


图 6 间断流仿真平台控制流程

Fig.6 Control workflow of intermitt traffic flow simulation platform

仿真时间的演变结果,如图 7 所示。图中显示了自由通过、跟驰排队、减速或停车让行等多种运行工况

情形。图8、9则展示了分别使用标准IDM和Pre-IDM+进行连续长时间仿真的车辆轨迹输出结果。结果显示,即使在基本单点阻断场景,标准IDM在交通随机加载下的模型失效率达14.8%,其中

车辆紧急制动10.3%、人车碰撞4.5%。相比之下,Pre-IDM+在仿真周期内均未出现人车碰撞现象,车辆加速度变化也更加平缓,进一步验证了Pre-IDM+和仿真平台的有效性。

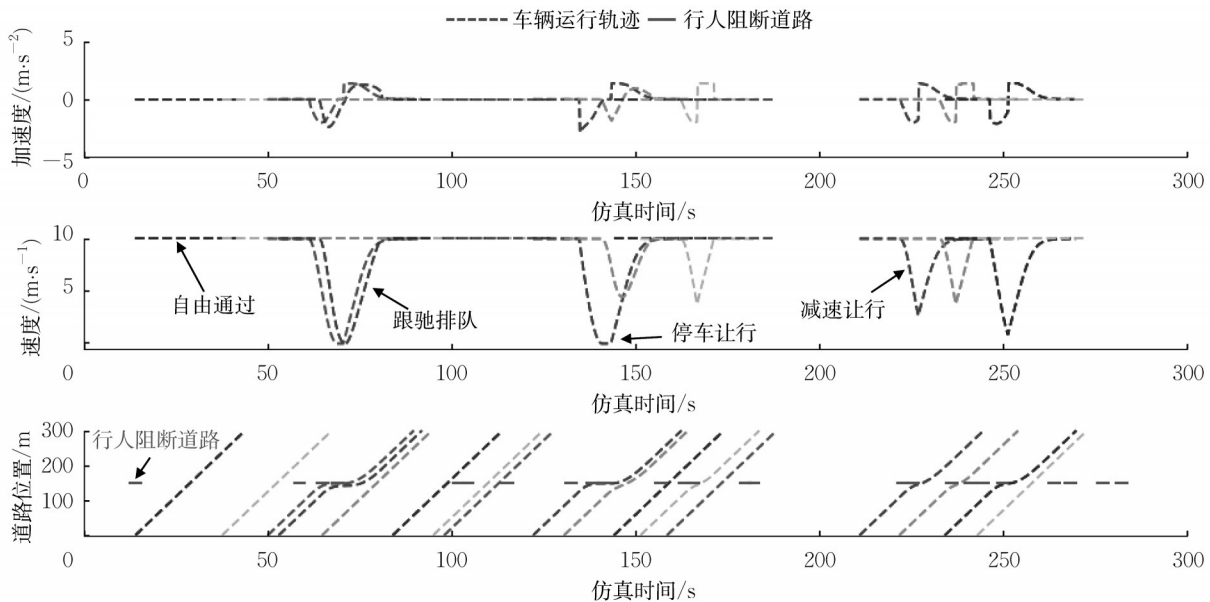


图7 间断流仿真平台车流运行轨迹输出结果示例

Fig.7 Example of output trajectories using intermitted traffic flow simulation platform

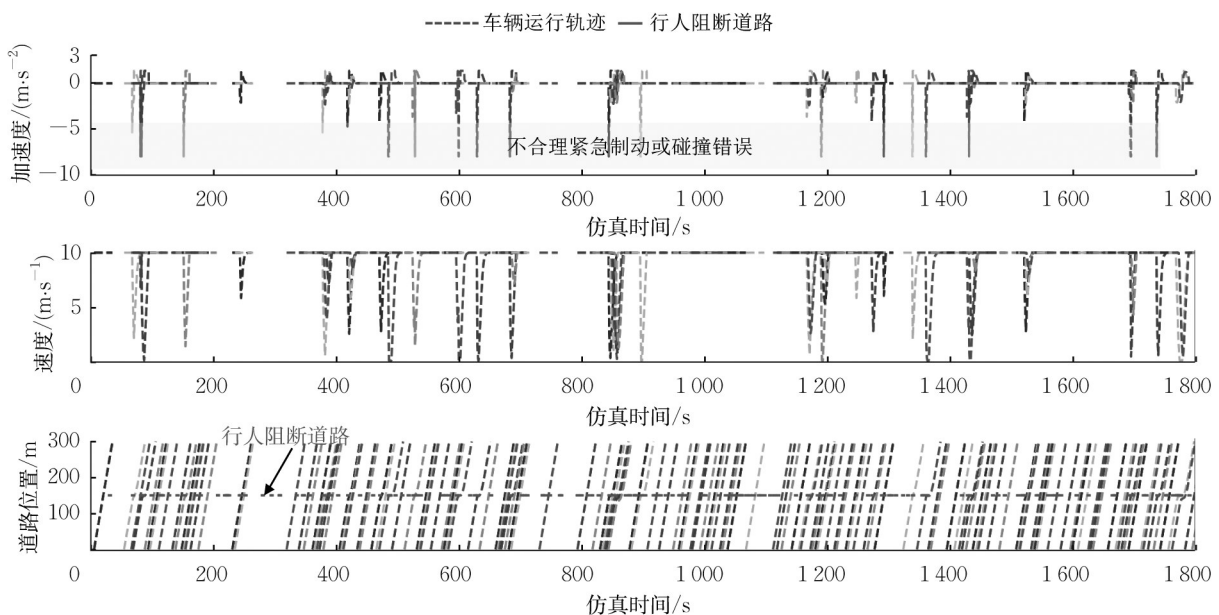


图8 标准IDM控制下连续长时间仿真轨迹输出结果示例

Fig.8 Example of output trajectories during long-time simulation period using normal IDM

3 仿真误差分析

3.1 交通分析指标归纳

通过观测各类交通分析指标在仿真系统中的输

出稳定性和数值波动大小来量化评估间断流分析的误差水平。根据仿真分析中的经典研究内容和本文模型结构特征,按运行轨迹、交通流特征、车辆控制状态3个维度选取误差分析的典型交通分析指标,

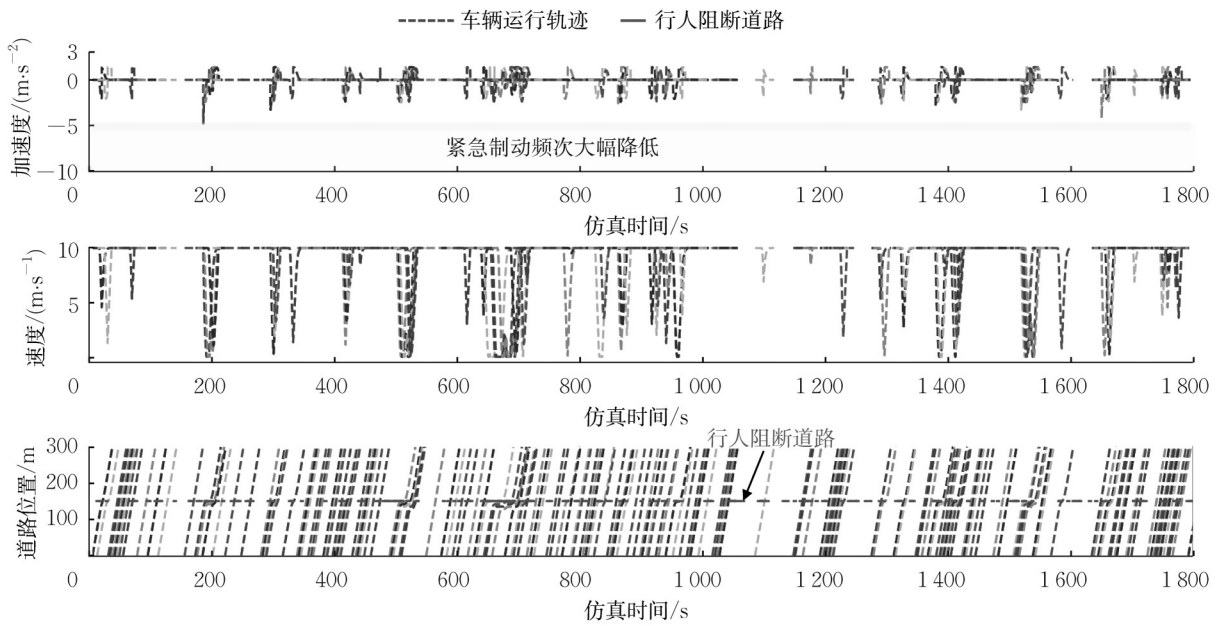


图 9 Pre-IDM 预决策控制下连续长时间仿真轨迹输出结果示例

Fig.9 Example of output trajectories during long-time simulation period using Pre-IDM+

如表 4 所示。其中,交通流特征指标选取时重点考虑对间断流运行过程的特殊刻画。车辆控制状态指标则侧重于车辆控制状态与周边路况信息交互影响

过程的表征,对自动驾驶算法调试和道路适驾性分析具有重要意义。交通分析指标计算方法如表 5 所示。

表 4 交通分析指标

Tab.4 Traffic analysis indexes

分析维度	指标具体内容(符号)
运行轨迹	平均速度(v_mean)、速度标准差(v_std)、加速度绝对值均值(a_abs_mean)、加速度绝对值标准差(a_abs_std)、平均减速度(dec_mean)
交通流特征	受阻车辆比例(not_free_r)、通行延误(t_delay)、停车次数(stops_count)、停车时长(stop_time)、加速度方向切换频次(a_change)
车辆控制状态	自由状态时间占比(free%)、跟驰状态时间占比(follow%)、避障状态时间占比(slow%)、停车状态时间占比(stop%)、控制状态切换频次(status_change)、车辆前方 10、20、30、50 m 范围内跟踪目标数量(ob10、ob20、ob30、ob50)

3.2 仿真样次误差影响

3.2.1 指标随机收敛特征

一般认为,当仿真样本量能够满足分析指标的统计误差要求时,仿真输出结果应是稳定且可重复的。定义分析指标的随机误差水平如下:相同分析场景下进行 2 轮独立的 m 次仿真实验。第 7 轮 m 次仿真的指标输出均值为 A ,第 2 轮 m 次仿真的指标输出均值为 A' ,则在样本量水平 m 下的指标随机误差计算式为:

$$\epsilon_A = \frac{2|A - A'|}{|A + A'|} \times 100\% \quad (4)$$

以单车行人穿越场景为例对车流通过单点随机阻断道路的交通分析指标进行仿真分析。仿真步长取 0.1 s,每次仿真模拟车流在路段中连续运行 35 min(前 5 min 用于交通状态预热),仿真样次 m 取

100、200、300、400、500 共 5 种水平。不同交通分析指标在各仿真样次下的随机误差如图 10 所示。

结果显示,在 100 仿真样次下, v_std 、 t_delay 、 $stops_count$ 、 $stop\%$ 和 $ob10$ 存在较大的随机波动,依次为 4.47%、5.99%、7.47%、7.85% 和 6.63%。相反, v_mean 、 dec_mean 则能保持较低的误差水平(0.47% 和 0.09%)。随着仿真样次的增加,各交通分析指标误差水平逐渐降低。当达到 500 仿真样次时,所有交通分析指标随机误差基本维持在 1% 范围内。可见,相比传统连续流分析中使用随机种子(一般低于 10 个样本)进行指标结果输出,间断流分析则需要依赖大量的实验样本才能保证指标输出结果的随机收敛,进一步说明了相关仿真误差分析的重要性。

3.2.2 仿真样次水平分析

确定合理的实验样本量以兼顾指标精度和分析

表 5 交通分析指标计算方法

Tab.5 Calculation method of traffic analysis indexes

分析指标	计算公式	参数解释
v_mean	$\sum \bar{v}_n / N$	\bar{v}_n 为车辆 n 通过路段平均速度, N 为仿真周期内通过车辆总数
v_std	$\sum v_{n, std} / N$	$v_{n, std}$ 为车辆 n 通过路段的速度标准差
a_abs_mean	$\sum a_n / N$	$ a_n $ 为车辆 n 在路段运行中的加速度绝对值均值
a_abs_std	$\sum a_n _{std} / N$	$ a_n _{std}$ 为车辆 n 在路段运行中的加速度绝对值标准差
dec_mean	$\sum \bar{d}_n / N$	\bar{d}_n 为车辆 n 处于减速状态下 ($a < 0$) 的减速度均值
not_free_r	N_{block} / N	N_{block} 为仿真周期内受阻车辆总数, 当车辆因让行人、跟驰前车或停车等待而产生交通延误时视为通过受阻
t_delay	$\sum (t_n - l / v_{n, f}) / N$	t_n 为车辆 n 通过路段的总运行时间, $v_{n, f}$ 为车辆 n 的自由流速度, l 为路段长度 (取 150 m)
stops_count	$\sum c_n / N$	c_n 为车辆 n 通过路段的停车次数
stop_time	$\sum t_{n, stop} / N$	$t_{n, stop}$ 为车辆 n 处于停车控制状态的运行时间
a_change	$\sum g_n / N$	g_n 为车辆 n 运行中加速度方向切换次数, 当车辆出现加速变减速、减速变加速、停车启动、减速停车时视为发生 1 次加速度方向切换
free%、follow%、slow%、stop%	$\sum (t_{n, i} / t_n) / N$	$t_{n, i}$ 为车辆 n 处于 i 控制状态下的运行时间 ($i = free, follow, slow, stop$)
status_change	$\sum h_n / N$	h_n 为车辆 n 通过路段时切换驾驶控制状态的次数
ob10、ob20、ob30、ob50	$\sum p_{n, s} / N$	$p_{n, s}$ 为车辆 n 在路段运行中前方 s m 范围内 ($s = 10, 20, 30, 50$) 需要观测跟踪的平均目标数 (包括其他车辆和过街行人)

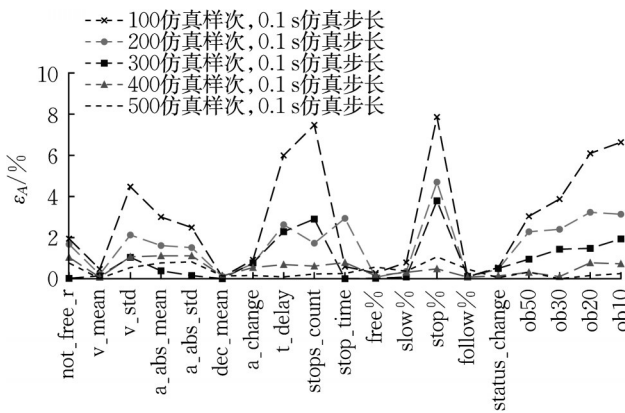


图 10 不同仿真样次下交通分析指标的随机误差

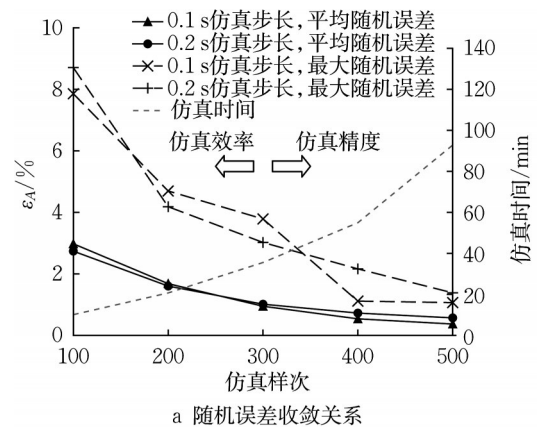
Fig.10 Random error of traffic analysis indexes under different simulation sample sizes

效率对仿真平台实践应用具有重要意义。所有交通分析指标随机误差均值和最大值变化关系如图 11a 所示。可以看到,随着仿真样次的增加,随机误差收敛速度逐渐下降并最终维持在 0.5% 附近。以最小随机误差和最短仿真时间作为增加比例计算基准,绘制仿真效益相对变化结果,如图 11b 所示。结果显示,当仿真样次为 200 时,指标输出精度和运算效率取得相对平衡 (总增长比例最低),可作为间断流交通仿真分析的样本量推荐值。

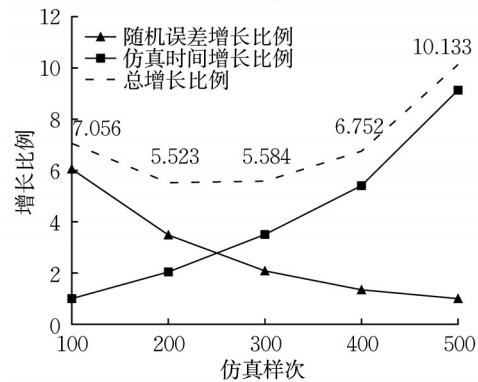
3.3 仿真步长误差影响

3.3.1 指标输出差异度

仿真步长决定了车辆状态和路况信息的更新周



a 随机误差收敛关系



b 仿真效益相对变化

图 11 随机误差和仿真时间随仿真样次的变化

Fig.11 Variation of random error and simulation time with simulation sample size

隔,当步长变化对指标数值结果影响较小时,设置较大的仿真步长能大幅提高指标输出效率、降低仿真

成本。以常用 0.1 s 和 0.2 s 仿真步长为例,对比分析不同步长下各交通分析指标输出差异水平。输出差异 ϵ_{AB} 计算方法为

$$\epsilon_{AB} = \frac{2|A - B|}{|A + B|} \times 100\% \quad (5)$$

式中: A 和 B 分别为 0.1 s 和 0.2 s 步长下进行 m 次仿真实验的指标输出均值。为了减少指标自身随机误差对分析结果的影响, m 均取 500 仿真样次。绘制 0.1 s 和 0.2 s 步长下的 ϵ_{AB} 及自身随机误差水平结果,如图 12 所示。

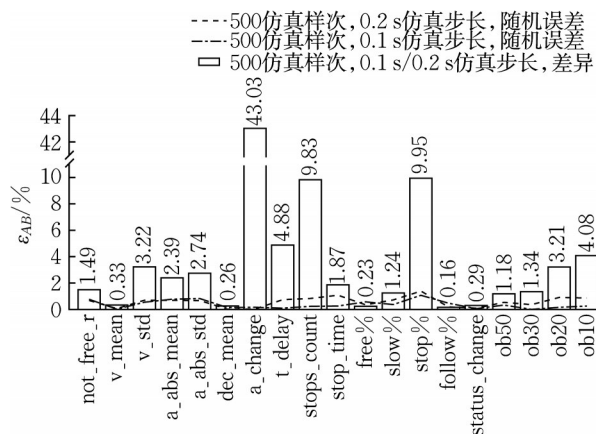


图 12 不同仿真步长下交通分析指标输出差异

Fig.12 Discrepancy error of traffic analysis indexes under different simulation updated time steps

可以看到,仿真步长对间断流交通分析指标结果的影响不容忽视(平均差异 4.83%)。仿真步长改变主要对车辆加减速度控制尤其是停车和启动决策过程影响最为明显。其中, $stops_count$ 和 $stop\%$ 的输出差异接近 10%, a_change 的输出差异高达 43.03%, 而 v_mean 、 dec_mean 、 $free\%$ 、 $follow\%$ 以及 $status_change$ 受仿真步长变化影响较为有限,在不同仿真步长下的输出差异均小于 0.5%。

3.3.2 指标变异系数

ϵ_{AB} 虽然能直观反映输出数值水平的绝对差异,但是对于自身随机误差较大的指标,即使其 ϵ_{AB} 较大也较难判断是由仿真步长改变导致的,还是由自身随机波动导致的。为了更好地揭示仿真步长对各指标影响的显著程度,进一步构建指标变异系数 μ , 计算式为

$$\mu = \frac{2\epsilon_{AB}}{\epsilon_A + \epsilon_B} \quad (6)$$

式中, ϵ_B 为 0.2 s 仿真步长下的指标随机误差,可类比式(4)得到。绘制不同仿真步长下交通分析指标

变异系数结果,如图 13 所示。

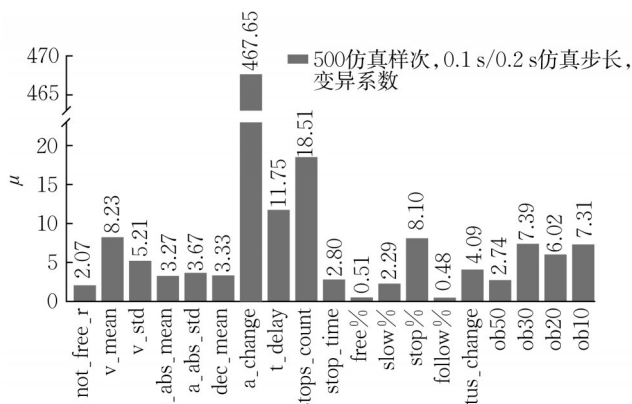


图 13 不同仿真步长下交通分析指标变异系数

Fig.13 Coefficient of variation for traffic analysis indexes under different simulation updated time steps

可以看到,除 $free\%$ 、 $follow\%$ 外,其余指标的变异系数均明显大于 1%。也就是说,在参考指标自身随机误差水平下,仿真步长对绝大多数指标及评估维度的影响依然是显著的(即使部分指标 ϵ_{AB} 较小)。上述结果表明,在间断流分析中,仿真步长设置应尽量贴合交通运行控制的真实粒度水平,以降低仿真时间离散化带来的潜在误差风险。当需在多个仿真系统间进行指标横向对比分析时,也应注意交通仿真分析步长是否一致,并优先参考差异较小的指标结果,如 v_mean 、 dec_mean 等。

3.4 评估可靠度分析

交通分析指标对模型外部参数(如仿真样次、步长)的敏感性越低,则其在不同仿真系统中的评估一致性越好、可靠度越高。根据本文仿真样次和仿真步长误差影响分析结果,汇总各指标在 200 仿真样次下的随机误差影响比例,并按 2% 误差阈值给出各指标在间断流分析中的推荐仿真样次和步长,如表 6、7 所示。

可以看到,不同交通分析指标的随机收敛性和步长敏感度具有相对独立性。综合总体误差水平可以发现, $stops_count$ 、 $stop\%$ 的随机误差(3.79%、4.70%)和仿真步长改变影响比例(9.83%、9.95%)都明显高于其他指标,评估可靠度不佳,不适合用于实验样本量和模型粒度较为受限的交通评估分析。相反, v_mean 、 dec_mean 、 $status_change$ 以及 $free\%$ 和 $follow\%$ 在 2 个分析维度上均表现出良好的稳定性(改变影响比例 < 1%),评估可靠度较优,更适合作为间断流交通仿真分析的优选通用指标。上述指

表6 运行轨迹和交通流特征指标可靠度分析

Tab.6 Reliability analysis on trajectory performance indexes and traffic flow performance indexes

分析指标	200仿真 样次随机 误差/%	误差<2% 推荐仿真 样次	仿真步长改 变影响 比例/%	误差<2% 推荐仿真 步长/s
v_mean	0.21	100	0.33	0.2
v_std	1.91	200	3.22	0.1
a_abs_mean	1.61	200	2.39	0.1
a_abs_std	1.52	100	2.74	0.1
dec_mean	0.35	100	0.26	0.2
a_change	0.73	100	43.03	0.1
not_free_r	1.24	100	1.49	0.2
t_delay	3.63	400	4.88	0.1
stops_count	3.79	400	9.83	0.1
stop_time	2.94	300	1.87	0.2

表7 车辆控制状态指标可靠度分析

Tab.7 Reliability analysis on vehicle control state indexes

分析指标	200仿真 样次随机 误差/%	误差<2% 推荐仿真 样次	仿真步长改 变影响 比例/%	误差<2% 推荐仿真 步长/s
free%	0.90	100	0.23	0.2
slow%	1.53	100	1.24	0.2
stop%	4.70	300	9.95	0.1
follow%	0.76	100	0.16	0.2
status_change	0.47	100	0.29	0.2
ob50	2.29	300	1.18	0.2
ob30	2.40	300	1.34	0.2
ob20	3.02	300	3.21	0.1
ob10	3.14	300	4.08	0.1

标可靠度分析结果可在一定程度上为间断流分析的误差估计以及面向自动驾驶的混合流评估指标筛选提供理论参考。需注意的是,这里给出的指标仿真样次和步长推荐值均是以单车道障碍穿越情形进行归纳,是误差要求的下限。

4 结语

通过拓展IDM和引入预决策控制流程提出了一种考虑横向阻断影响的运动学车流建模方法(Pre-IDM+)。通过自主搭建的间断流仿真平台,分别对运行轨迹、交通流特征、车辆控制状态3类交通分析指标的随机收敛特征和仿真步长敏感度进行了定量讨论。结果显示,200仿真样次能较好地平衡指标输出精度和仿真效率,而仿真步长改变主要对车辆停车决策相关指标的输出稳定性产生影响。交通分析指标中,平均速度、减速度均值、控制状态切

换频次以及自由/跟驰状态时间占比的数值稳定性和评估一致性较优,更适合作为间断流交通分析的通用评估指标。

总体来看,本文分析结果在一定程度上揭示了复杂路况交通运行分析时可能存在的评估离散和随机性问题,验证了间断流分析中保持模型兼容性和合理确定仿真采样形式的重要性。对交通仿真系统运行稳定性和交通分析指标输出误差的定量归纳也为后续应用相关仿真平台在实际道路场景下进行交通运行特征对比评估奠定了基础。

作者贡献声明:

涂彭越:交通建模,数据采集,仿真平台搭建,指标误差分析,论文撰写。

白玉:研究问题提出,实验场景设计,分析指标整理,结论归纳,论文修订。

参考文献:

- [1] 王璐,张书茂,陈旸.基于元胞自动机的无信号路口交通流仿真分析[J].科技创新与应用,2022,12(5):63.
WANG Lu, ZHANG Shumao, CHEN Yang. Simulation analysis of traffic flow at un-signalized intersections based on cellular automata[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(5): 63.
- [2] ZHAO H, YANG S, CHEN X. Cellular automata model for urban road traffic flow considering pedestrian crossing street[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 462: 1301.
- [3] LI C, LIU S, CEN X. Safety and efficiency impact of pedestrian-vehicle conflicts at non-signalized midblock crosswalks based on fuzzy cellular automata[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 572: 125871.
- [4] WANG J, LV W, JIANG Y, et al. A cellular automata approach for modelling pedestrian-vehicle mixed traffic flow in urban city[J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 115: 1.
- [5] 邝先验,吴玉刚,刘平,等.考虑速度空间横向伸缩效应的混合交通流模型[J].公路交通科技,2021,38(7):114.
KUANG Xianyan, WU Yugang, LIU Ping, et al. A mixed traffic flow model considering stretching effect of transverse space caused by vehicle speed[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(7): 114.
- [6] 庞明宝,裴亚男,张宁.中小学门口道路上学混合交通流的综合仿真[J].系统仿真学报,2018,30(3):1162.
PANG Mingbao, PEI Yanan, ZHANG Ning. Integrated simulation of mixed traffic flow on elementary and middle school gate's road when students going to school[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1162.
- [7] 连培昆,李振龙,荣建,等.基于VISSIM微观交通仿真软件的导流岛机非冲突元胞自动机模型[J].计算机应用,2016,

- 36(6): 1745.
LIAN Peikun, LI Zhenlong, RONG Jian, *et al.* Cellular automaton model of vehicle-bicycle conflict at channelized islands based on VISSIM microscopic traffic simulation software[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(6): 1745.
- [8] MALENJE J O, ZHAO J, LI P, *et al.* An extended car-following model with the consideration of the illegal pedestrian crossing [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 508: 650.
- [9] MALENJE J O, ZHAO Jing, LI Peng, *et al.* Vehicle yielding probability estimation model at unsignalized midblock crosswalks in Shanghai, China[J]. *PLOS One*, 2019, 14(3): e0213876.
- [10] ZHAO J, MALENJE J O, TANG Y, *et al.* Gap acceptance probability model for pedestrians at unsignalized mid-block crosswalks based on logistic regression [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 129: 76.
- [11] ZHAO J, MALENJE J O, WU J, *et al.* Modeling the interaction between vehicle yielding and pedestrian crossing behavior at unsignalized midblock crosswalks [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2020, 73: 222.
- [12] 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.
LIU Qiyuan, SUN Jian, TIAN Ye, *et al.* Modeling and simulation of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicles at mixed flow road section [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1585.
- [13] 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仿真[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(7): 994.
NI Ying, XIN Liuyan, LONG Keyu. Modeling and simulation of right-turning vehicle-bicycle interaction at intersections [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(7): 994.
- [14] 李逸昕, 倪颖, 孙剑. 混合交通流交叉口共享空间交互行为建模及仿真[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(3): 255.
LI Yixin, NI Ying, SUN Jian. Modeling and simulation of interaction between road users at mixed-traffic intersections[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 22(3): 255.
- [15] 马文欣, 李瑞敏. 检测数据驱动的交通仿真参数标定方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(12): 2808.
MA Wenxin, LI Ruimin. Research on detection data driven calibration method of traffic simulation parameters [J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(12): 2808.
- [16] 孙剑, 杨晓光, 刘好德. 微观交通仿真系统参数校正研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(1): 48.
SUN Jian, YANG Xiaoguang, LIU Haode. Study on microscopic traffic simulation model systematic parameter calibration[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(1): 48.
- [17] 刘昕, 刘志远, 聂品, 等. 微观交通仿真模型参数标定研究综述[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(11): 3179.
LIU Xin, LIU Zhiyuan, NIE Pin, *et al.* A survey of microscopic traffic simulation calibration methods[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(11): 3179.
- [18] 周晨静, 荣建, 郭琳科. 微观交通仿真模型参数标定结果取值方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(12): 2802.
ZHOU Chenjing, RONG Jian, GUO Linke. Research on the value accessing method for calibrating micro traffic simulation model parameters [J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(12): 2802.
- [19] 周晨静, 高亚聪, 荣建. 微观交通仿真模型参数标定方法改善研究[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(11): 2112.
ZHOU Chenjing, GAO Yacong, RONG Jian. Research on improvement of parameters calibration method of microscopic traffic simulation model [J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(11): 2112.
- [20] 林晓辉, 徐建闽, 魏文钰, 等. 车联网仿真实验平台搭建与参数校正研究[J]. *物流科技*, 2020, 43(5): 50.
LIN Xiaohui, XU Jianmin, WEI Wenyu, *et al.* Study on construction of connected-vehicle network simulation experimental platform and its parameters correction [J]. *Logistics Sci-Tech*, 2020, 43(5): 50.
- [21] 马庆禄, 张琳, 袁新新, 等. 城市道路交通多状态演化下的连续仿真技术研究[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(4): 847.
MA Qinglu, ZHANG Lin, YUAN Xinxin, *et al.* Continuous simulation technology for multi-state evolution of urban road traffic [J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(4): 847.
- [22] 李瑞杰, 李林波, 李杨, 等. 跟驰模型场景基准分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(7): 922.
LI Ruijie, LI Linbo, LI Yang, *et al.* Scenario-based benchmark analysis for car-following models [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(7): 922.
- [23] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. *Physical Review E*, 2000, 62(2): 1805.
- [24] KESTING A, TREIBER M. How reaction time, update time, and adaptation time influence the stability of traffic flow [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2008, 23(2): 125.
- [25] SCHAKEL W J, VAN AREM B, NETTEN B D. Effects of cooperative adaptive cruise control on traffic flow stability[C]// 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 759-764.
- [26] TAPANI A. Vehicle trajectory effects of adaptive cruise control [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2012, 16(1): 36.
- [27] YU H, JIANG R, HE Z, *et al.* Automated vehicle-involved traffic flow studies: a survey of assumptions, models, speculations, and perspectives [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2021, 127: 103101.