

2-19-2020

Integrated Simulation Test Platform for Environment Perception and Planning Decision of Intelligent Vehicle

Sun Jian

1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;;

Runhan Huang

1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;;

Li Lin

2. Shanghai International Automobile City, Shanghai 201804, China;

Qiyuan Liu

1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Integrated Simulation Test Platform for Environment Perception and Planning Decision of Intelligent Vehicle

Abstract

Abstract: The simplicity of testing modules and the lack of high-fidelity and high-density traffic scenes are the primary issues in the intelligent vehicle' simulation test. To solve these problems, a *"software in the loop" integration test platform is built*. The environmental perception module is integrated on the basis of the PreScan, the planning decision-making module designed by MATLAB/Simulink and the virtual traffic flow environment from Vissim. *Based on this platform, high-fidelity traffic flow scenes can be generated rapidly to support the test of environment perception and decision-making integratedly and effectively. Moreover, the intelligent vehicle's influence on the traffic flow can be evaluated comprehensively.* A case study of an expressway on-ramp proves the feasibility of the simulation platform.

Keywords

intelligent vehicle, integrated simulation test, PreScan, Vissim, environment perception, decision-making

Authors

Sun Jian, Runhan Huang, Li Lin, Qiyuan Liu, and Yudi Li

Recommended Citation

Sun Jian, Huang Runhan, Li Lin, Liu Qiyuan, Li Yudi. Integrated Simulation Test Platform for Environment Perception and Planning Decision of Intelligent Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(2): 236-246.

智能汽车环境感知与规划决策一体化仿真测试平台

孙剑¹, 黄润涵^{1*}, 李霖², 刘启远¹, 李宇迪¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海国际汽车城(集团)有限公司, 上海 201804)

摘要: 为了解决智能汽车在虚拟仿真测试过程中存在的测试模块单一化、较难提供高密度高逼真交通流场景等问题, 利用智能汽车仿真软件 PreScan 的环境感知仿真与规划决策开发工具箱 MATLAB/Simulink, 以及交通仿真软件 Vissim 快速生成高逼真环境车流的功能, 搭建了智能汽车“软件在环”一体化测试平台。该平台可快速搭建智能汽车高逼真仿真场景, 可快速有效地对智能汽车的环境感知与规划决策模块进行一体化仿真测试, 还能综合评估智能汽车对交通流的影响。通过快速路汇入区仿真案例, 验证了本仿真测试平台的有效性。

关键词: 智能汽车; 一体化仿真测试; PreScan; Vissim; 环境感知; 规划决策

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 02-0236-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0102

Integrated Simulation Test Platform for Environment Perception and Planning Decision of Intelligent Vehicle

Sun Jian¹, Huang Runhan^{1*}, Li Lin², Liu Qiyuan¹, Li Yudi¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai International Automobile City, Shanghai 201804, China)

Abstract: The simplicity of testing modules and the lack of high-fidelity and high-density traffic scenes are the primary issues in the intelligent vehicle's simulation test. To solve these problems, a "software in the loop" integration test platform is built. The environmental perception module is integrated on the basis of the PreScan, the planning decision-making module designed by MATLAB/Simulink and the virtual traffic flow environment from Vissim. Based on this platform, high-fidelity traffic flow scenes can be generated rapidly to support the test of environment perception and decision-making integrately and effectively. Moreover, the intelligent vehicle's influence on the traffic flow can be evaluated comprehensively. A case study of an expressway on-ramp proves the feasibility of the simulation platform.

Keywords: intelligent vehicle; integrated simulation test; PreScan; Vissim; environment perception; decision-making

引言

由于在解决交通安全、道路拥堵以及改善驾乘

体验上具有巨大潜力, 甚至极有可能改变人类的交通模式, 具有自动驾驶和网联功能的智能汽车将是未来交通的发展趋势及核心, 世界各国高度重视其对社会经济的重大影响^[1-3]。

智能汽车要达到量产阶段需经过严格、漫长的测试过程。目前, 对智能汽车的测试评价方法可以归纳为 4 类: 仿真测试、驾驶模拟器测试、受控场地测试和实车路试。现实交通环境中的实车路试受



收稿日期: 2018-03-01 修回日期: 2018-12-25;
基金项目: 国家自然科学基金(51422812), 上海市科委国际科技合作项目(16510711400);
作者简介: 孙剑(1979-), 男, 山东齐河, 博士, 教授, 博导, 研究方向为交通仿真、交通流理论、交通大数据、智能网联汽车测试与评估。

<http://www.china-simulation.com>

法律、安全和人力物力等各因素限制,在智能汽车早期发展阶段,难以大规模展开。试验场地测试和驾驶模拟器测试往往针对单车的功能测试,无法在精确的受控交通流场景下进行场地实验,更无法实现较真实的交通流场景,且场地实验仍存在耗时耗力、费用高昂、有一定安全隐患等问题^[4]。考虑到仿真测试具有能模拟“真实”交通流环境、条件可控、安全保障、可加速加载测试等显著优势,智能汽车高可信度虚拟仿真测试成为智能车发展过程中亟需解决的问题,也是当前国际研究的热点,并得到了非常广泛的应用^[5-8]。然而,目前智能汽车仿真测试还存在如下问题和难点:

(1) 智能汽车包括环境感知、规划决策和控制执行 3 个核心模块,控制执行是传统车辆测试的核心,而环境感知和规划决策是智能汽车测试的关键。目前对环境感知及规划决策的测试大都单独独立进行,未能进行一体化整合测试。

(2) 智能汽车的“智力水平”取决于其规划决策阶段的能力,而高逼真度仿真交通流场景直接决定虚拟测试的有效性^[9]。目前的仿真测试较难提供真实的交通流场景(如快速路瓶颈段高密度车流交互、机动车-非机动车混杂运行等)。

(3) 目前的测试大多仅关注智能汽车本身,而忽视其对周围车辆及交通流运行的影响评价。而且其测试评估指标以安全为主,未能综合考虑安全、行驶效率、舒适性等多类指标。

为解决上述问题,本研究整合环境感知仿真软件 PreScan、规划决策仿真开发工具箱 Matlab/simulink 与交通流仿真软件 Vissim,建立了综合考虑智能汽车环境感知、规划决策及周边影响的一体化虚拟测试平台。该平台通过 PreScan 提供智能汽车不同的环境感知仿真功能,Vissim 提供高真实度交通流场景。该平台不仅能快速高效测试不同传感器布置方案及规划决策行为的综合影响,还能对周边交通流运行进行协同测试。本文最后以快速路汇入区智能汽车仿真测试为例,对测试平台的有效性进行了验证。

1 智能汽车仿真一体化测试平台建立背景

为了搭建智能汽车环境感知及规划决策一体化仿真测试平台,需要能够提供智能汽车不同环境感知设备设置的仿真软件,以及可以快速生成智能汽车周边高真实性交通流的微观仿真软件。PreScan 和 Vissim 的结合,可以满足以上的需求。

1.1 智能汽车环境感知仿真软件 PreScan

PreScan 是一款为高级驾驶辅助系统(ADAS)和智能汽车系统提供开发环境的仿真软件工具。它集成了 ADAS 和 IV 系统所需要的各种传感器,包括毫米波雷达、激光雷达、超声波雷达、视频采集器及 GPS 等,能够精确扫描、采集周围环境的信息,为智能汽车环境感知提供精确信息来源。

PreScan 可运用于自适应巡航控制系统(ACC)、紧急制动系统(AEBS)、车道变换辅助系统(LCAS)及车联网系(V2V/V2I)的智能汽车仿真中。并且,与其他同类智能汽车虚拟测试系统如 Dspace、Carmaker 相比,PreScan 在实现各种复杂交通场景的构建、对周边各类环境及交通参与者的感知性能上更加精细^[10],有利于提高智能汽车感知系统测试的准确性。

因此,本仿真平台利用 PreScan 作为智能汽车环境感知仿真工具,通过它与 MATLAB/Simulink 的工具箱相连接,可以实现规划决策算法的植入,以实现智能汽车对周围环境识别仿真、支撑规划决策算法评估的功能。

1.2 智能汽车交通流仿真软件 Vissim

Vissim 是一种微观的、基于时间步长和驾驶行为为的仿真工具,用于模拟和分析各种交通信号、交通构成、车道设置等不同交通环境下,城市交通和公共交通的运行情况,其对车辆间跟驰,变道及其他交互行为仿真相比于其它同类软件更加精细化和拟人化,可以较为真实的实现不同密度车流情况下道路交通场景的仿真。同时,它还可以以文件的

形式输出各种交通评价参数,如排队长度、延误等,可对不同的交通设计方案进行评价。

与 CORSIM、Paramics 及 TransModeler 等微观仿真软件相比,Vissim 的各类交通行为模型如跟驰、变道、让行等,能够更真实细致地反映交通行为;其在通信能力方面也更加精细,可以更好地反应交通环境信息;同时,Vissim 在各种场景(交叉口或大规模路网)下的仿真,具有较高的效率^[11]。

Vissim 可以通过 Driving Simulator 模块与 PreScan 实现快速互联。因此,本仿真平台采用 VISSIM 作为背景交通流快速生成的工具。

1.3 智能车辆一体化仿真平台优点

PreScan 与 Vissim 的特点如表 1 所示。将两者结合,优势互补,使得本研究搭建的仿真平台具有以下优点:

(1) 利用 Vissim 快速输入交通环境车流,克服了 PreScan 难以快速有效生成智能汽车周边车辆的

不足,大大节省了仿真场景的搭建时间。并且通过 PreScan 提供的功能齐全的各类传感器感知仿真模块,可以同时进行智能汽车的环境感知及规划决策能力的一体化整合测试。

(2) Vissim 提供的交通流环境,不仅可以与智能汽车进行有效交互,而且其内部车辆也会按照 Vissim 的驾驶行为模型产生相互影响,提高了仿真场景的逼真性,可有效解决目前的仿真测试较难提供真实的交通流场景这一难题。

(3) 利用 PreScan 提供完备而精确的传感器,可以设置不同的传感器配置方案,配合不同的规划决策模型,使得智能汽车仿真更丰富。

(4) 可通过 PreScan 提供的智能汽车相关运行指标(如速度、加速度、TTC 等),Vissim 提供的受影响车流的指标(如行程时间、延误、受影响车辆数等),建立更全面、综合的评价体系,有效地对智能汽车影响进行综合评价,而不再是仅关注智能汽车本身。

表 1 PreScan 与 Vissim 特点
Tab. 1 Characteristics of PreScan and Vissim

特点	PreScan	Vissim
智能汽车各类传感器	有(自由设置)	无
智能汽车规划决策算法	可通过 MATLAB/Simulink 实现连接 或者直接通过 API 连接	无
智能车测试路网设置	简易 (有交叉口、路段、弯道等构成路网的基本模块)	可实现任意路网形态 (基于 link-connector-结构)
智能汽车周边车辆	较难 (需针对每辆车单独输入进入时刻,路径等)	简单 (直接输入流量即可)
周边车辆运动状态及交互	很难表现 (需要针对每辆车设置与周边车辆的交互行为模型)	可以简易实现 (软件内部设置有车辆的交互行为模型)

2 一体化测试平台搭建

2.1 Prescan+Vissim 一体化测试平台搭建原理

智能汽车的测试平台由无人车环境感知及规划决策软件 PreScan 及交通流仿真软件 Vissim 组成。其中,PreScan 提供的信息包括测试路网、智能汽车的速度、位置,智能汽车各类传感器布设方案,智能汽车的规划决策模型等信息。Vissim 软

件内部会提供测试路网,智能汽车周边速度、位置、运动角度等信息及智能汽车周边车辆的交互行为模型,生成接近真实的交通流场景。两个软件可以利用 Matlab 的 simulink 模块,即可以实现车辆信息的相互连接。即 Vissim 读入 PreScan 的智能汽车信息,并使智能汽车周边普通车辆对智能汽车的行为作出反应,PreScan 也可以读入 Vissim 的背景交通流信息,实现 Prescan+Vissim 一体化测试平台的搭建。平台搭建的原理图如图 1 所示。

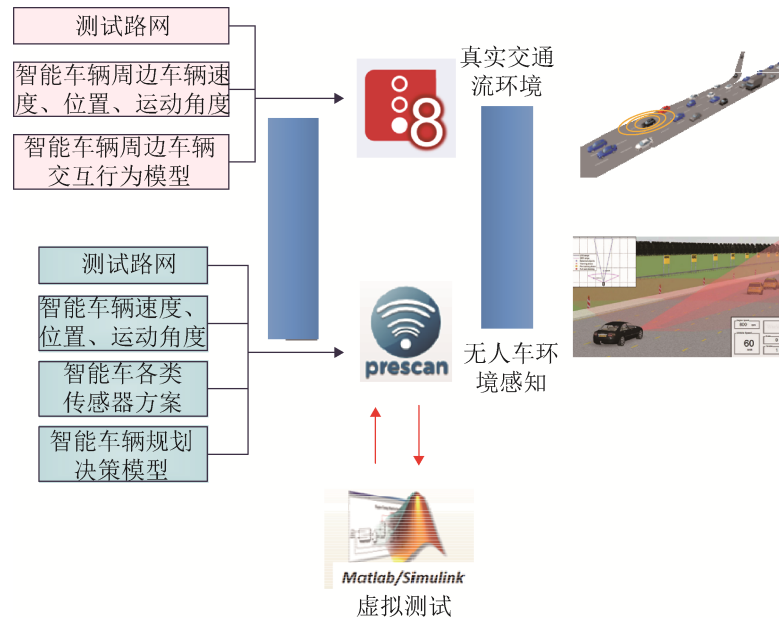


图 1 PreScan+Vissim 测试平台搭建原理

Fig. 1 Frameworks of integrated test platform with PreScan and Vissim

2.2 PreScan+Vissim 测试平台搭建流程

该平台搭建流程有 8 个步骤:

(1) 为构建虚拟测试环境, 首先在满足软件配置服务器按顺序安装 Matlab 软件、PreScan 软件及 Vissim 软件, 其中 Vissim 软件需要有 Driving simulator 模块许可。

(2) 安装完成后, 在 PreScan 软件插件模块中, 添加存储 Vissim 导入信息的文件夹, 以用以存储读入的 Vissim 信息。

(3) 在 PreScan 中设置智能驾驶车辆的车辆类型, 以及智能汽车周边显示的 Vissim 各类车辆数。

(4) 在 PreScan 中新建测试智能汽车的路网, 新建完成后, 在 Vissim 中建立与 PreScan 比例尺等信息一致的路网模型。

(5) 在 PreScan 中设置智能汽车各类传感器布设方案, 并设置智能汽车的规划决策模型。

(6) 设置 Vissim 的智能汽车周边普通车辆的输入, 主要包括流量, 车型, 各类运行及让行规则等信息。

(7) PreScan 与 Vissim 的仿真频率均设为 20 Hz。

(8) 在 PreScan 模块界面点击连接 Vissim 运行

的按键, 同时在 Vissim 模块中选择启动 Driving Simulator 模块, 计算机的 Matlab/Simulink 模块即开始双向传输 PreScan 与 Vissim 的信息。

PreScan 读入 Vissim 提供的智能汽车周边普通车辆信息后, 生成虚拟仿真测试场景, 如图 2 所示。

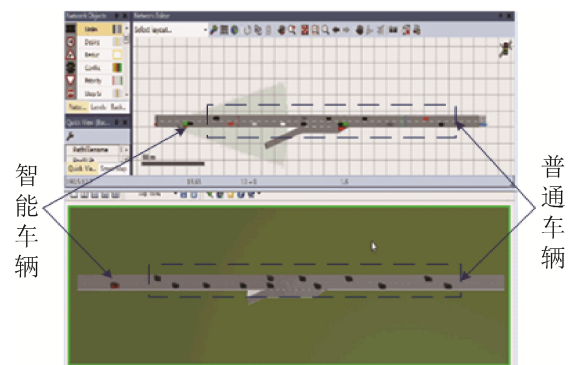


图 2 PreScan+Vissim 测试平台连接

Fig. 2 Connection between PreScan and Vissim

2.3 PreScan+Vissim 测试平台搭建难点

仿真测试平台搭建过程中, 需要注意以下几个难点:

(1) PreScan 与 Vissim 车辆信息交互

在 PreScan 与 Vissim 的连接中, PreScan 的智能车辆信息与 Vissim 的普通车流的信息动态实时

交互是测试平台搭建最为核心的问题。在测试平台中, PreScan 通过其所属的插件 Plugins Vissim Setting 模块, 读入 Vissim 的 inpx 及 layx 文件中的路网设置、车辆路径、实时车流位置状态等信息, 同时根据用户设置的各类可视化车辆类型及数量, 在对象池(object pool)中生成智能车周边的可视化车辆模型, 用来作为 Vissim 车流在 PreScan 中的“映射”。另一方面, 在 Vissim 中, 通过激活其所属的 Driving Simulator 模块及车型设置, 可以读入 PreScan 的智能车辆信息至 Vissim 仿真界面, 实现 PreScan 智能车信息与 Vissim 的交互。PreScan 与 Vissim 信息交互插件设置如图 3 所示。

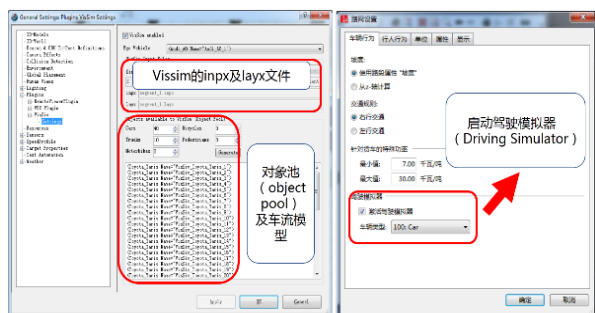


图 3 一体化仿真平台信息交互插件

Fig. 3 Configurations of information interaction plugins

(2) 通信同步: PreScan 与 Vissim 的仿真频率须保持一致, 以实现两者之间的通信同步。PreScan 智能车辆运行时, 需要按照一定步长, 根据环境感知信息实时地计算并控制车辆行使状态, 所有周边的动态环境需要保持相同的频率更新(即需要 Vissim 的周边普通车辆需要以相同的频率更新车辆位置、速度等信息), 否则会使交互行为失效、模型输出数据不准确。本仿真平台的推荐频率为 Vissim 的最高仿真频率 20 Hz。PreScan 与 Vissim 通信同步设置如图 4 所示。

(3) PreScan 及 Vissim 的车辆起终点的非正常交互处理: 在 PreScan 及 Vissim 路网设置过程中, 如果 PreScan 的路网起点在 Vissim 后方, 当仿真 0 s 时刻开始时, PreScan 中智能车辆即停留在起点处(实际上用户设置的智能车辆从如 10 s 时刻才开始

启动), 由于交互作用, 智能车辆会阻挡 Vissim 的正常车流驶入路网。同理, 如果 PreScan 的路网终点较 Vissim 提前, PreScan 智能车辆在其路网终点停止(直至仿真完全结束后才消失), 仿真过程中并不会从 Vissim 的路网中消失, 会对 Vissim 的普通车辆产生阻碍。路网端点设置如图 5 所示, 蓝色表示 PreScan 路网长度, 红色表示 Vissim 路网长度。PreScan 路网起点要早于 Vissim 发车点, 终点要稍迟于 Vissim 路网终点, 避免 PreScan 的车辆起在终点位置阻挡 Vissim 车辆。

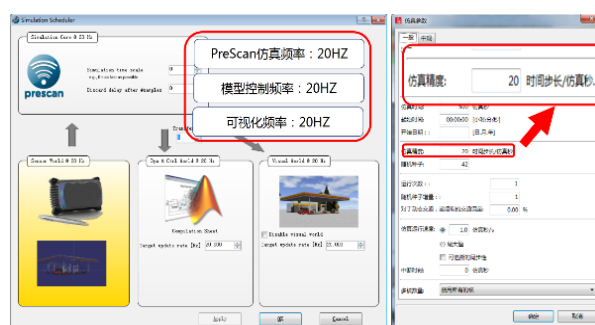


图 4 一体化仿真平台通信同步

Fig. 4 Configurations of communication synchronization module

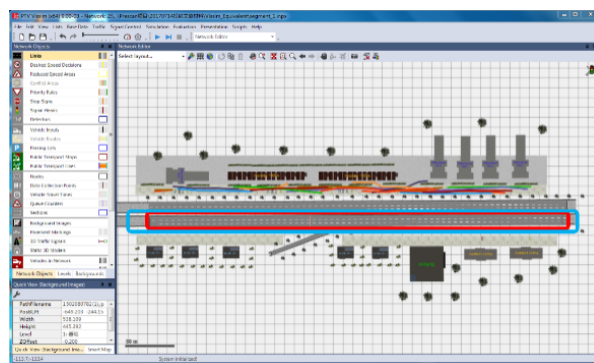


图 5 一体化仿真平台路网端点设置

Fig. 5 Setting of segment endpoints in Vissim

(4) 定位同步: Vissim 在创建路网时, 其坐标必须与 PreScan 路网一致, 包括各车道、连接段等位置坐标, 使 PreScan 及 Vissim 输出的智能车辆及周围普通车辆坐标信息相匹配, 从而实现车辆的准确定位及交互。设置如图 6 所示。

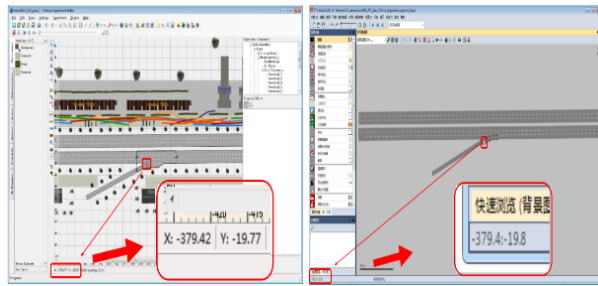
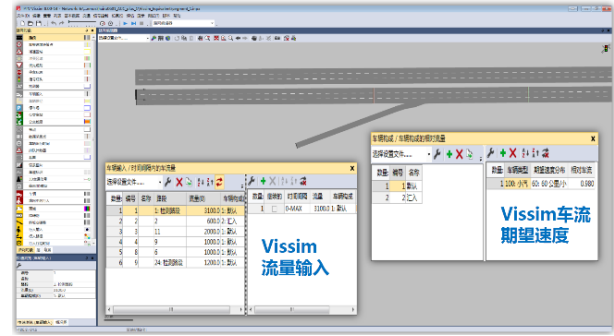


图 6 一体化仿真平台定位同步

Fig. 6 Positioning synchronization between PreScan and Vissim



步骤 2: Vissim 路网搭建及流量输入

3 仿真平台测试流程及应用

3.1 一体化仿真测试平台仿真流程

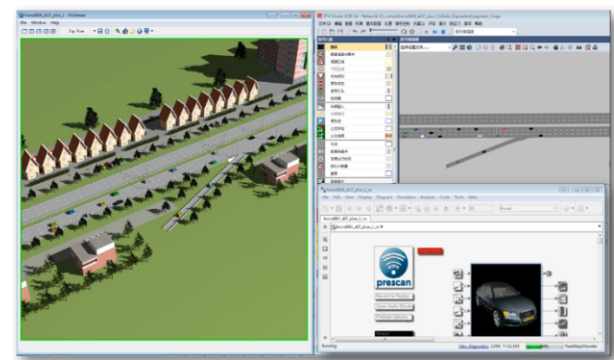
本文一体化仿真平台的仿真流程分为四个步骤, 如图 7 所示。

步骤 1: 在 PreScan 中设置智能汽车及相关传感器、控制策略。

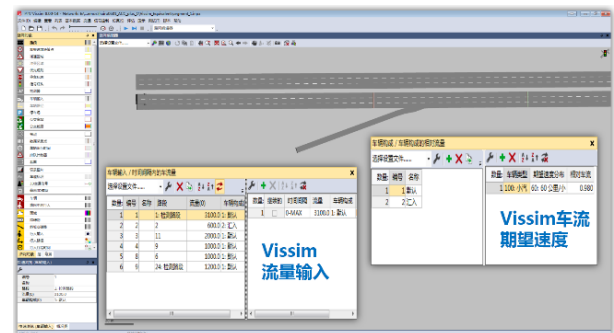
步骤 2: 在 Vissim 中建立相应的路网, 并输入流量作为智能汽车的交通环境车流。在该步骤中, VISSIM 的路网坐标必须与 PreScan 一致, 同时需要启动 Vissim 的 driving simulator 模块。

步骤 3: 通过 Simulink 将 PreScan 与 Vissim 相连接, 并设置仿真时间等参数, 进行仿真。

步骤 4: 通过 PreScan 输出智能汽车的运行状态数据, Vissim 输出受影响车流的时空轨迹数据。用户可以根据相应的评价指标, 如安全、舒适等, 对仿真过程进行评价。



步骤 3: 平台各模块连接及仿真



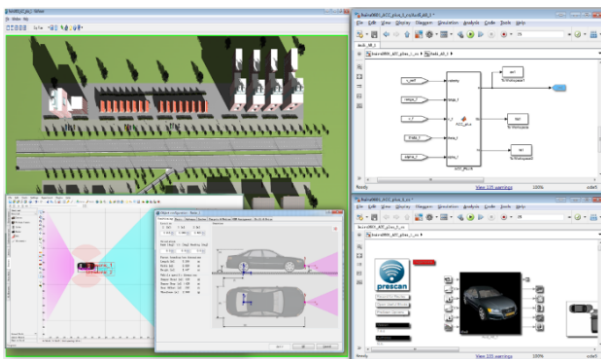
步骤 4: 仿真数据输出

图 7 一体化仿真平台仿真流程

Fig. 7 Simulation process of integrated simulation platform

3.2 智能汽车汇入区规划决策模型

为了测试仿真平台的有效性, 本文搭建了快速路匝道汇入区仿真场景, 并选用智能驾驶模型 (IDM)、考虑侧向汇入车辆的改进智能驾驶模型 (CF+) 以及协同跟驰与策略性换道模型 (CF+LCA) 作为智能汽车的决策模型, 对智能汽车在汇入点处的感知决策进行仿真, 并进行评价。3 种智能汽车决策模型比较对比如表 2 所示。



步骤 1: 传感器方案及控制模型配置

表 2 3 种智能汽车决策模型比较对比
Tab. 2 Comparison of three intelligent vehicle decision models

序号	模型	特点	感知范围	模型决策
1	IDM	以统一的形式同时描述车辆从自由流到拥堵流的不同状态, 只考虑本车道前车的影响	本车道前车	判断同一车道前车运行状态, 跟驰行驶
2	CF+	在 IDM 模型基础上改进了感知决策能力, 特别是考虑侧向车流汇入的影响并提前做出决策	本车道前车、侧向汇入车辆	判断同车道前车及侧向汇入车辆运行状态, 跟驰行驶
3	CF+LCA	在 CF+模型基础上加入可接受间隙的协同换道模型, 考虑侧向汇入车流的同时考虑相邻车道的车辆运行状态	本车道前车、侧向汇入车辆及相邻车道车辆	判断同车道前车、侧向汇入车辆及邻近车道车辆运行状况, 跟驰或协同换道

3.2.1 仿真场景说明

快速路是城市交通的重要通道, 而匝道汇入区等常发性瓶颈处的交通流失效, 是导致快速路拥堵的重要因素^[12]。在快速路主道上行驶的车辆, 不仅要与同车道上的前车保持一定的安全距离, 还需要注意匝道处汇入的车辆, 以确保行车安全性。匝道车辆汇入主线决策的多变性, 对智能汽车在该场景处的安全运行造成较大的挑战。为了达到测试的安全性要求, 本文在仿真平台上搭建了快速路汇入区仿真场景, 用虚拟的场景对智能汽车进行测试。

3.2.2 智能驾驶模型(IDM)

IDM 模型是由 Helbing 等^[13]提出, 以统一的形式同时描述车辆从自由流到拥堵流不同状态的跟车模型。但 IDM 模型仅考虑与同车道前车的跟驰行为, 不考虑侧向车辆的影响。

IDM 模型具体形式如式(1)所示。

$$a_{IDM} = \begin{cases} a_p \cdot [1 - (\frac{v}{v_d})^\delta], & S \leq 0 \\ a_p \cdot [1 - (\frac{v}{v_d})^\delta - (\frac{S}{L})^2], & S > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S = S_0 + S_1 \cdot \sqrt{\frac{v}{v_d}} + T \cdot v + \frac{v \cdot \Delta v}{2\sqrt{a_p \cdot b}}$

a_{IDM} 为跟驰车辆的加速度, 为系统实时计算, 频率为 20 Hz; a_p 为最大加速度, 取值为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; v 为跟驰车辆速度; v_d 为期望速度, 取值为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (快速路); Δv 为跟驰车辆与引导车辆的速度差; L 为跟驰车辆与引导车辆车间空距; S 为期望间距; S_0 为停车间距, 取值为 1 m; T 为安全

跟驰时距, 取值为 1.2 s; b 为舒适减速度, 取值位为 $-2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; δ 为取值为 4 的参数。使用该模型不用对跟驰状态和自由行驶状态进行区分, 且模型中的最大加速度 a_p 和舒适减速度 b 两项能防止模型产生不符合实际的加速度或减速度。IDM 模型的智能汽车跟驰示意图如图 8 所示。

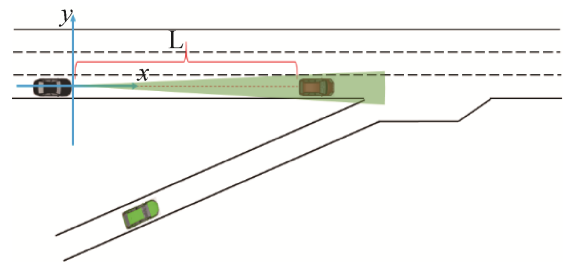


图 8 IDM 模型参数示意图
Fig. 8 Illustration of parameters in IDM model

3.2.3 考虑侧向汇入车辆的改进智能驾驶模型(CF+)

考虑到 IDM 模型存在只考虑本车道前方直行车辆而忽略侧向汇入车辆的问题, 在其基础上提出 CF+跟驰模型。在 CF+模型中, 主线上的智能汽车不仅需要考虑本车道前方跟驰车辆, 还需要考虑汇入段车辆(智能汽车雷达实时检测到距离最近的匝道汇入车辆)的位置及速度, 提前进行加减速操作, 避免与汇入车辆产生冲突, CF+跟驰模型的智能汽车跟驰示意图如图 9 所示。

在图 9 中, θ 为目标在雷达坐标系上的水平偏转角, 沿雷达坐标系 x 轴顺时针旋转为正, 反之为负。 α 为雷达在目标坐标系上的入射角, 沿目标坐标系 x_1 轴逆时针旋转角度为正。 d_v 为雷达检测目

标的多普勒速度,沿径向方向向外为正,反之为负。 v 为智能驾驶车辆 x 轴方向上的速度, v_1 为目标车辆在其坐标系沿 x_1 轴的速度。 t_1 为目标车辆横向靠近智能驾驶车辆的时间。 d 为两车间的距离, a_1 为智能驾驶车辆的 x 轴方向上的加速度。

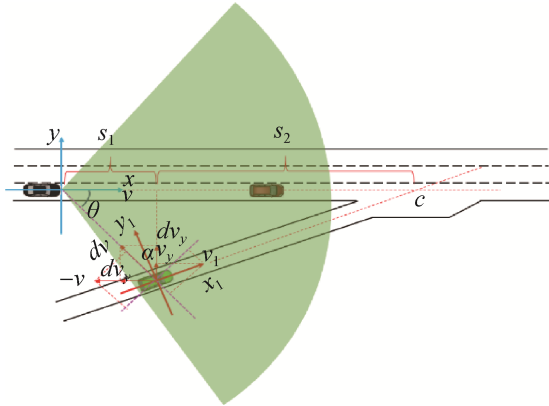


图 9 CF+跟驰模型参数示意图
Fig. 9 Illustration of parameters in CF+ model

本模型中只考虑右侧的汇入车辆,故对模型作了简化处理,即只考虑智能汽车前置雷达的右侧及前侧检测数据,角度范围为:

$$0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ \text{ \& } 0 < \alpha < 180^\circ \text{ \& } \alpha \neq 90^\circ$$

汇入车辆沿匝道进入主线时的速度满足:

$$v_1 = \frac{v \cdot \cos \theta + d_v}{\cos(180^\circ - \alpha)} \quad (2)$$

汇入车辆横向接近智能车辆的速度满足式(3):

$$v_y = v_1 \cdot \cos(\theta + \alpha - 90^\circ) \quad (3)$$

即匝道车辆横线与智能车辆碰撞的时间 t_1 为式(4)所示:

$$t_1 = \frac{d \cdot \sin \theta}{v_y} = \frac{d \cdot \sin \theta}{v_1 \cdot \cos(\theta + \alpha - 90^\circ)} \quad (4)$$

智能车辆此时与期望冲突点的距离如式(5)所示:

$$S_d = S_1 + S_2 = d \cdot \cos \theta + d \cdot \sin \theta \cdot \tan(\theta + \alpha - 90^\circ)^{-1} \quad (5)$$

则 a_1 的计算公式为:

$$a_1 = \frac{2 \cdot (S_d - v \cdot t)}{t^2} \quad (6)$$

此时,根据 IDM 模型,可以得出智能驾驶车辆与本车道前车的一个跟驰加速度 a_{IDM} ,以及智能

驾驶车辆与前车的碰撞时间 t_{IDM} 。如果 $t_1 < t_{IDM}$,则智能驾驶车辆以加速度行驶 a_1 ,反之以 a_{IDM} 行驶。

3.2.4 协同跟驰与策略性换道模型(CF+LCA)

在 CF+模型中,虽然可以检测侧向汇入车辆并作出决策,但智能汽车的驾驶行为仅局限于本车道。如果主路与匝道间存在水平高差或者障碍物,会导致主路智能汽车不能像人类一样敏感地感知到侧向汇入车辆。当在接近汇入点处感知到汇入车辆时,智能汽车仅能在本车道上采取以极大减速度来减速的决策,有可能导致后方车辆反应不及时而发生危险。考虑到以上问题,在 CF+LCA 模型中,主线行驶的智能汽车检测到与匝道汇入车辆可能产生冲突时,不仅可以在本车道上进行行为决策,同时可以根据交通状况协作变道至内侧车道,避免与汇入车辆的冲突,CF+LCA 跟驰模型示意如图 10 所示。

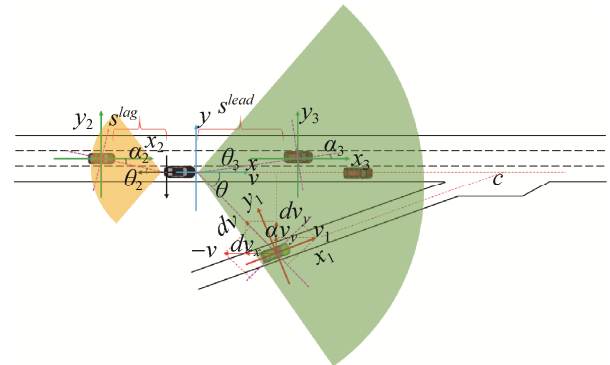


图 10 CF+LCA 模型参数示意图
Fig. 10 Illustration of parameters in CF+LCA model

在 CF+LCA 模型中,汇入车辆的速度计算及接近智能汽车的时间 t_2 计算与 CF+模型相同。根据 IDM 模型计算与前车的加速度 a_{IDM} ,以及跟驰时距 t_{IDM} 。 S^{lead} 与 S^{lag} 为智能驾驶车辆与目标车道前后车间距大小, d_2 为智能驾驶车辆与汇入车辆的直线距离。

当智能汽车在行驶过程中(每 0.05 s 判断一次),同时满足 $d_2 < 20 \text{ m}$, $t_2 < t_{IDM}$, $S^{lead} > G^{lead}$, $S^{lag} > G^{lag}$ 这 4 个条件时,汇入车辆开始执行协作变道。其中 G^{lead} 与 G^{lag} 为协作变道时可接受的最

小前后车间隙。这里的可接受间隙采用非线性可接受间隙模型^[14]，其计算公式如式(7)-(8)：

$$G^{lead} = \exp[1.541 + 1.893 \max(0, \Delta v^{lead}) + 0.04 \min(0, \Delta v^{lead}) + 0.854] \quad (7)$$

$$G^{lag} = \exp[1.426 + 0.195 \max(0, \Delta v^{lag}) + 0.954] \quad (8)$$

式中： Δv^{lead} 为智能汽车与目标车道间隙前方车辆速度差； Δv^{lag} 为目标车道间隙后方车辆与智能汽车速度差。

当智能汽车在行驶过程中，满足 $d_2 \geq 20 \text{ m}$ 或 $d_2 < 20 \text{ m} \& t_2 \geq t_{IDM}$ 时，采用 IDM 跟驰模型行驶。

当智能车在行驶过程中，满足 $d_2 < 20 \text{ m}$ ， $t_2 < t_{IDM}$ ， $S^{lead} \leq G^{lead}$ 或 $S^{lag} \leq G^{lag}$ 3 个条件时，采用 CF+ 的策略行驶。

3.3 仿真评价指标

目前智能汽车仿真测试大多仅关注智能汽车本身，而忽视其对周围车辆及交通流运行的影响评

价，未能综合考虑测试车周围车流行驶安全、舒适性等多类指标。

为了全面评价智能汽车仿真结果，本文利用 PreScan 仿真得到智能汽车单车仿真运行数据，Vissim 得到受影响车队的轨迹数据，从智能汽车单车、受影响车流两方面建立智能汽车仿真测试的评价体系。本研究从安全性、舒适性选取评价指标。

智能汽车单车评价选取 TTC(Time To Collision，碰撞时间)作为安全性评价指标，其正常值大于 1.5 s，小于 1.5 s 时车辆有发生碰撞的危险；选取 Jerk 值(加加速度)来评价舒适性，值越小，表示加速度变化率越小，行车越舒适。

选取受影响车队(定义为智能汽车后续车流每个车道跟驰行驶的连续 3 辆车)中，车头时距小于 1 s 的车辆数作为评价车队安全性的指标；后续车队的 Jerk 值大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$ 的车辆数作为评价车队舒适性的指标，值越大舒适性越低。评价体系如表 3 所示。

表 3 仿真评价指标体系
Tab. 3 Simulation evaluation system

评价对象	评价指标类型	评价指标参数	智能车规划决策模型可接受合理范围
智能驾驶车单车评价指标	安全性	TTC	$TTC > 1.5 \text{ s}$
	舒适性	加加速度 Jerk	$Jerk < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$
后续受影响车队评价指标	车队安全性	后续车辆跟驰时距小于 1 s 的车辆数	临界值： $T = 1 \text{ s}$
	车队舒适性	加加速度大于临界值的后续车辆数量	临界值： $Jerk = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$

3.4 仿真结果评价

仿真案例中，Vissim 车流量为主路 3 100 辆/h (主路单向三车道，每个车道平均车流量为 1 034 辆/h)，平均车头间距约为 58.1 m；汇入匝道为 600 辆/h，车流结构为小车：大车=98:2，小车的期望速度是 60 km/h，大车为 50 km/h。仿真时间为 25 s，其中前 5 s 为预热时间。智能汽车的初速度均为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，3 个模型的交通流场景一致。

3.4.1 智能汽车单车评价

(1) 安全性：图 11 为 TTC 时变图(令 TTC 值大于 5 s 的数值等于 5 s)。在相同的交通场景下，

IDM 模型作为规划决策模型时，智能汽车在 16 s 附近出现 $TTC < 1.5 \text{ s}$ 的情况，其与侧向汇入的车辆发生碰撞，安全性无法保证。CF+模型在汇入点附近的 TTC 值大于 CF+LCA 模型，但两者均大于 1.5 s，智能汽车能够安全通过汇入区。

(2) 舒适性：图 12 为 Jerk 值时变图。3 个模型的 Jerk 值在相同的到达汇入点之前都出现了大于 1 的情况。由于决策模型不同，故表现并不一致，智能汽车在这些点处的舒适性低；但在通过汇入点之后，CF+模型出现了频繁的不舒适情况，而 CF+LCA 模型的舒适性相对较好。

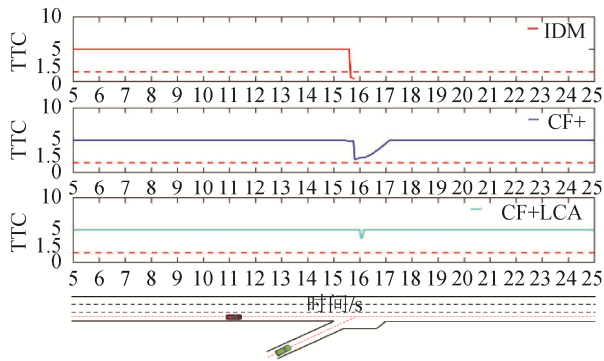


图 11 智能汽车 TTC 时变图

Fig. 11 Time varying diagram of intelligent vehicle's TTC

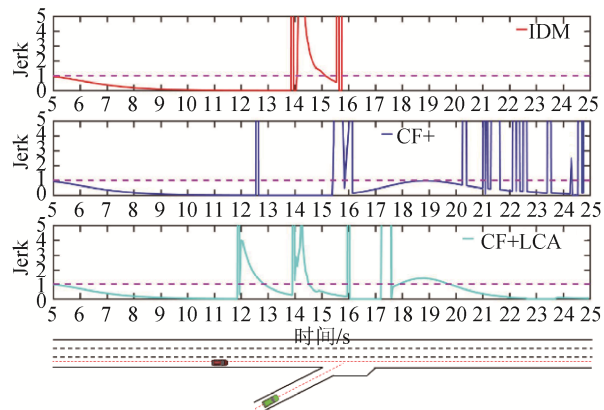


图 12 智能汽车 Jerk 值时变图

Fig. 12 Time varying diagram of intelligent vehicle's Jerk

在智能汽车单车评价中, CF+LCA 模型无论是安全性还是舒适性, 其表现均优于其他两个模型; CF+模型评价结果次之, 而 IDM 模型在该仿真场景中无法保证安全性。

3.4.2 受影响车流评价

(1) 安全性: 如图 13 所示, 在 IDM 模型中, 车流中车头时距小于 1 s 的车辆数在汇入点附近由 1 变为 2, 原因是智能汽车紧急刹车, 造成跟随行驶和普通驾驶车辆没有足够的反应时间减速, 与智能汽车发生追尾事故。CF+模型到达汇入点之前及通过汇入点之后, 车流中不安全行驶的车辆数为 1; 而 CF+LCA 模型在前 20 s 的时间里, 后续车流均能够安全行驶。整个过程中, CF+LCA 模型对后续车流的安全影响较小。

(2) 舒适性: 由图 14 可以看出, 在 3 个模型中, CF+LCA 的受影响车流 Jerk 值大于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ 的

车辆数在通过汇入区过程要比其他两个模型多, 这是因为在该模型中, 智能汽车作出了变换车道的决策, 不仅影响到本车道的后续车辆, 同时影响了目标车道的后续来车, 但其整体舒适性比 IDM 模型高, 次于 CF+模型。

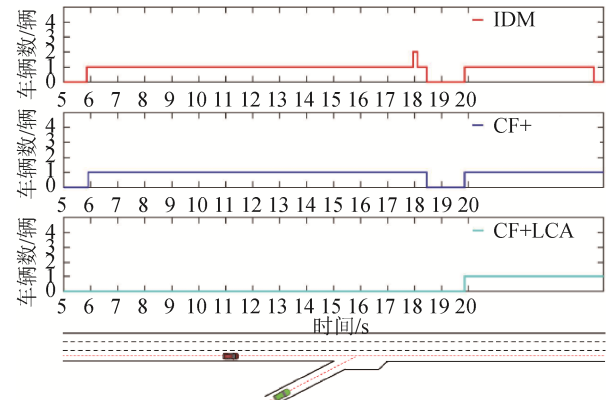
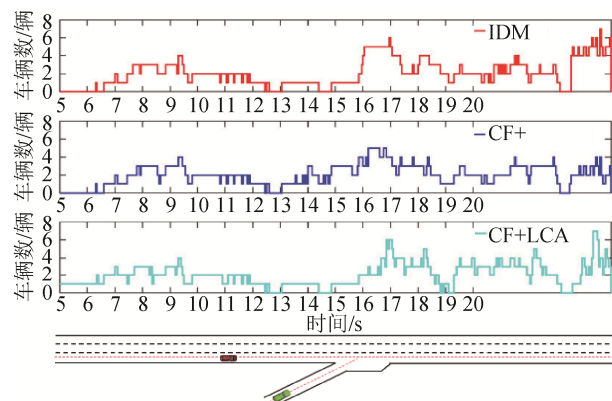


图 13 受影响车流车头时距小于 1 s 的车辆数

Fig. 13 Number of vehicles affected by vehicle flow with headway less than 1 s

图 14 受影响车流 Jerk 值大于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ 的车辆数Fig. 14 Number of vehicles affected by traffic flow with Jerk value greater than $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$

在受影响车流的综合评价里 CF+LCA 模型在安全性方面表现最好, CF+模型次之, IDM 模型最差; 在舒适性指标中, CF+模型表现最好, CF+LCA 模型次之, IDM 效果排在最后。

4 结论

本文利用 PreScan+Vissim 仿真测试软件搭建了智能汽车一体化仿真测试平台, 为解决目前智能

汽车仿真测试存在的问题提供了帮助, 并采用不同的决策模型对智能车进行了仿真及评价, 验证仿真测试平台的有效性, 主要结论如下:

(1) 利用 PreScan 的 MATLAB/ Simulink API 以及 Vissim 的驾驶模拟器 API, 可以实现两类仿真软件的实时通信和信息交换。

(2) 通过本仿真测试平台, 可以快速搭建高逼真性的智能汽车仿真场景, 建立环境感知及规划决策一体化仿真测试。

(3) 可以从智能汽车及环境车流两方面建立综合评价体系来评价整个仿真过程, 而不仅仅只关注智能汽车本身。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 中国制造 2025[R]. China Manufacturing 2025. 2015.
- [2] Kalra N, Paddock S M. Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability[J]. Transportation Research Part A (S0965-8564), 2016, 94: 182-193.
- [3] 孙剑, 张娟. 城市快速路瓶颈交通流失效生存分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 530-535.
Sun Jian, Zhang Juan. Survival analyses of traffic flow breakdown at urban expressway bottlenecks[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(4): 530-535.
- [4] Ehlert P A M, Rothkrantz L J M. Microscopic traffic simulation with reactive driving agents[C]// ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 01TH8585). IEEE, 2001: 860-865.
- [5] Wymann B, Dimitrakakis C, Sumner A, et al. TORCS, the open racing car simulator, v1.3.5[J/OL]. 2013. <https://sourceforge.net/projects/torcs/>
- [6] Scott P, Hans A, Xinxin D, et al. Perception, Planning, Control, and Coordination for Autonomous Vehicles[J]. Machines, 2017, 5(1): 6.
- [7] Johnson-Roberson M, Barto C, Mehta R, et al. Driving in the matrix: Can virtual worlds replace human-generated annotations for real world tasks? [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017, 746-753.
- [8] Dosovitskiy A, Ros G, Codevilla F, et al. CARLA: An Open Urban Driving Simulator[J/OL]. arXiv preprint, 2017. <https://arxiv.org/abs/1711.03938>
- [9] He H W, Lu Y M, Lou Y. Virtual reality based intelligent vehicle modeling in driving SIMULATION system[C]// International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. IEEE, 2006: 1-5.
- [10] 胡生远. 车道保持硬件在环仿真系统设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
Hu Shengyuan. Design of Hardware-in-the-Loop Simulation System for Lane keeping System[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [11] 臧志刚, 陆锋, 李海峰, 等. 7 种微观交通仿真系统的性能评价与比较研究[J]. 交通信息与安全, 2007, 25(1): 66-70.
Zang Zhigang, Lu Feng, Li Haifeng, et al. Performance Evaluation and Comparison of Seven Microscopic Transportation Simulation Systems[J]. Computer and Communications, 2007, 25(1): 66-70.
- [12] Sun J, Zhao L, Zhang M, et al. Mechanism of Early-Onset Breakdown at On-Ramp Bottlenecks on Shanghai, China, Expressways[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2014, 2421: 64-73.
- [13] Helbing D, Hennecke A, Shvetsov V, et al. Micro- and macro-simulation of freeway traffic[J]. Mathematical & Computer Modelling An International Journal (S0895-717), 2002, 35(5/6): 517-547.
- [14] Sun J, Ouyang J, Yang J. Modeling and Analysis of Merging Behavior at Expressway On-Ramp Bottlenecks[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2014, 2421(1): 74-81.