

汽车智能化轨迹规划与跟随的仿真环境[◎]

吴梦勋¹, 张素民¹, 孙浩¹, 邓伟文¹, 刘斌², 尚秉旭², 邱少波²

1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室

2. 第一汽车集团技术中心

【摘要】 本文提出并建立了一个基于 Matlab/Simulink 的汽车轨迹规划与跟随的仿真环境, 该仿真环境提供了动态轨迹规划模块、轨迹跟随控制器、车辆动力学模型、人机图形交互界面和仿真数据后处理工具以支持对典型预定义工况和自定义工况的仿真。在该仿真环境下, 对典型的车辆智能避障驾驶进行了仿真。

【关键词】 智能驾驶, 轨迹规划, 轨迹跟随, 图形交互界面, 仿真环境

Simulation Environment for Intelligent Vehicle Trajectory Planning and Tracking

Wu Mengxun¹, Zhang Sumin¹, Sun Hao¹, Deng Weiwen¹, Liu Bin², Shang Bingxu², Qiu Shaobo²

1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University

2. China FAW Group R&D Center

Abstract: This paper proposed a simulation environment for intelligent vehicle trajectory planning and tracking under Matlab/Simulink. The proposed environment consists of modules of vehicle dynamic trajectory planning, trajectory tracking control, vehicle dynamics, graphical user interface and data post-processing tools, with the aim to support simulation for not only typical pre-defined driving scenarios, but also any user-defined driving scenarios. Under this simulation environment, some typical intelligent driving simulations were conducted with obstacle avoidance.

Key words: intelligent driving, trajectory planning, trajectory tracking, graphical user interface, simulation environment

引言

汽车智能驾驶系统的主要功能是在对汽车及其行驶环境的感知基础上, 规划汽车安全行驶轨迹, 设计先进的控制策略和算法, 实现对汽车的运动控制, 并辅助驾驶人或替代驾驶人操纵等^[1]。因此研究和开发汽车轨迹规划算法和轨迹跟随控制是实现汽车避障和安全行驶的关键技术之一。

传统上汽车轨迹规划和跟随的研发基于大量的实车试验, 研发周期长、成本高、试验工况不易设置且难以重复, 安全性也无法保障。因此基于物理的建模和基于数值的仿真技术越来越成为了汽车智能化研发的关键技术手段。

本文提出并建立了一个基于 Matlab/Simulink 的汽车轨迹规划与跟随的仿真环境, 该环境不仅支持对典型工况及以典型工况为基础的任意仿真工况的设置和定义, 还包括动态轨迹规划模块、轨迹跟随控制器、支持仿真的人机图形交互界面和仿真数据后处理工具等, 大大提高了研发的效率和实用性。

该仿真环境与传统的车辆动力学仿真平台如 CarSim 相比, 具有以下主要优势: 1) 系统及界面使用灵活, 可根据使用者需求进行功能定制; 2) 传统平台程序通常为黑盒, 而该仿真环境使用 Matlab 脚本语言进行编程, 源程序开放, 可通过相对简单的编程满足复杂的计算需求; 3) 传统平台主要针对车辆动力学研究, 而该仿真环境除了包括车辆动力学模型, 还可进一步满足汽车智能化研究的需求, 包括传感集成、轨迹规

划等。

本课题开展了用于汽车智能化轨迹规划与跟随的仿真环境的研究工作。

1 仿真环境架构

仿真平台整体架构如图 1 所示。

仿真平台包括仿真模块以及支持仿真的人机图形交互界面 (GUI) 两大部分, 其中仿真模块包括汽车行驶环境模块、交通车辆/障碍物模块、轨迹规划模块、轨迹跟随模块以及车辆动力学模块等。作为轨迹规划模块的输入, 汽车行驶环境模块根据仿真工况要求设置仿真所需场景, 包括道路几何数据、道路摩擦系数等信息。交通车辆模块模拟汽车行驶过程中的交通车 (障碍物) 及其产生的干扰。

轨迹规划模块、轨迹跟随模块和人机图形交互界面 (GUI) 等将在下几节分别详细介绍。

1.1 轨迹规划模块

轨迹规划模块是该仿真环境的核心模块之一, 其功能是根据汽车行驶环境和交通车信息以及本车信息, 规划出期望轨迹, 并将期望轨迹的信息传递给轨迹跟随模块进行控制。

本文所述仿真环境, 目前所采用的轨迹规划方法是在分层决策框架下, 通过将日常结构化道路上发生的驾驶行为抽象为保持车道和换道两种基本驾驶行为的组合, 以换道为研究重点, 提出的一种考虑全局最优性的动态轨迹规划方法。

◎ 基金项目: 本项目受国家自然科学基金的资助 (项目号: 51175215)。

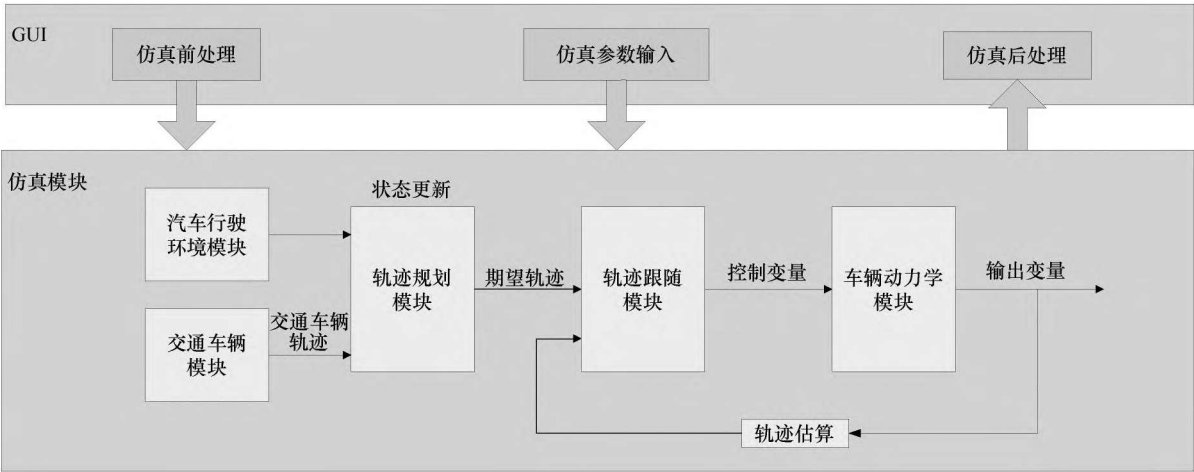


图1 仿真平台整体架构

该算法首先计算综合考虑车辆性能（侧向加速度）和换道效率的最优转向盘转角。转向盘转角与换道时间的关系式如公式（1）

$$t(d) \approx \frac{\frac{W(t)}{u} - t_1 \sin q - \frac{u_1^2 d}{2L(1+Ku^2)} \cos q}{q + \frac{u_1 d}{L(1+Ku^2)} + \frac{\left(q + \frac{u_1 d}{L(1+Ku^2)}\right)^3}{3}} \quad (1)$$

转向盘转角与侧向加速度的关系如公式（2）

$$a_y(d) = \frac{u^2}{L} d \quad (2)$$

通过调整成本函数 J 中的权重系数 w_1 和 w_2 ，可获得满足诸多性能指标的最优方向盘转角。其中，

$$\min(J) = \min[w_1 a_y^2(d) + w_2 t^2(d)] \quad (3)$$

得到最优转向盘转角后，将其输入一个具有高置信度和高效率的车辆动力学模型，可以得到一个最优车辆轨迹。接着进行动态搜寻，将获得的轨迹与交通车预估轨迹在时间-空间组成的二维搜索空间中进行比较，若存在碰撞风险则调

整转向盘转角获得新的全局轨迹进行检测，直到找到一条安全可行的车辆轨迹^[2]。

作为仿真平台的主要功能之一，轨迹规划模块可以实现对各种轨迹规划算法的调用并在仿真平台环境下进行验证。为方便轨迹规划算法的编写以及使用时的灵活性，在设计模块时定义了标准的输入输出接口。因此，可在实车实验之前在仿真环境下对轨迹规划算法进行初步验证，且具有较大的灵活性及通用性。

1.2 轨迹跟随模块

轨迹跟随模块也是仿真环境的核心模块之一，架构如图2所示。

轨迹跟随模块的功能是接收来自轨迹规划模块规划出的期望路径以及期望速度，并根据车辆当前状态计算所需的转向盘转角、加速或减速量，通过转向盘、加速踏板、制动踏板对车辆运动状态进行控制，使得车辆按照轨迹规划所计算出的路径与速度运动。

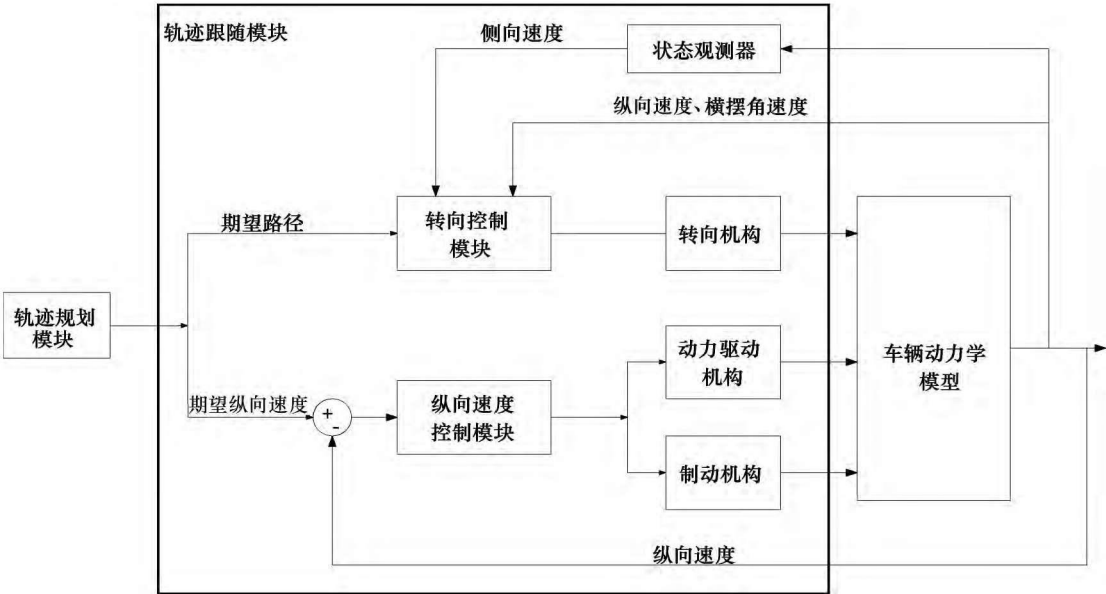


图2 轨迹跟随模块架构

轨迹跟随算法分为两个部分,分别是侧向控制和纵向控制。侧向控制采用了多点预瞄的最优预瞄算法^[3,4],通过求取预瞄点处预期侧向位移与实际侧向位移(通过车辆动力学计算车辆响应)之间的误差,进行加权求和,进而通过加权函数获得最优转向盘转角。纵向速度控制采用的是经典的PID算法^[5]。

同轨迹规划模块相同,轨迹跟随模块也定义了轨迹跟随算法的标准输入输出接口,在此之上可自由替换轨迹跟随算

法,使得在实车实验之前即可对算法进行初步验证,节约经费及时间成本。

1.3 人机图形交互界面(GUI)^[6]

为了更方便快捷地进行研究工作,提升研究效率,设计了GUI人机图形交互界面,能够实现对仿真过程的控制,参数的输入,数据的采集、显示、分析等功能。

GUI界面功能结构如图3所示。

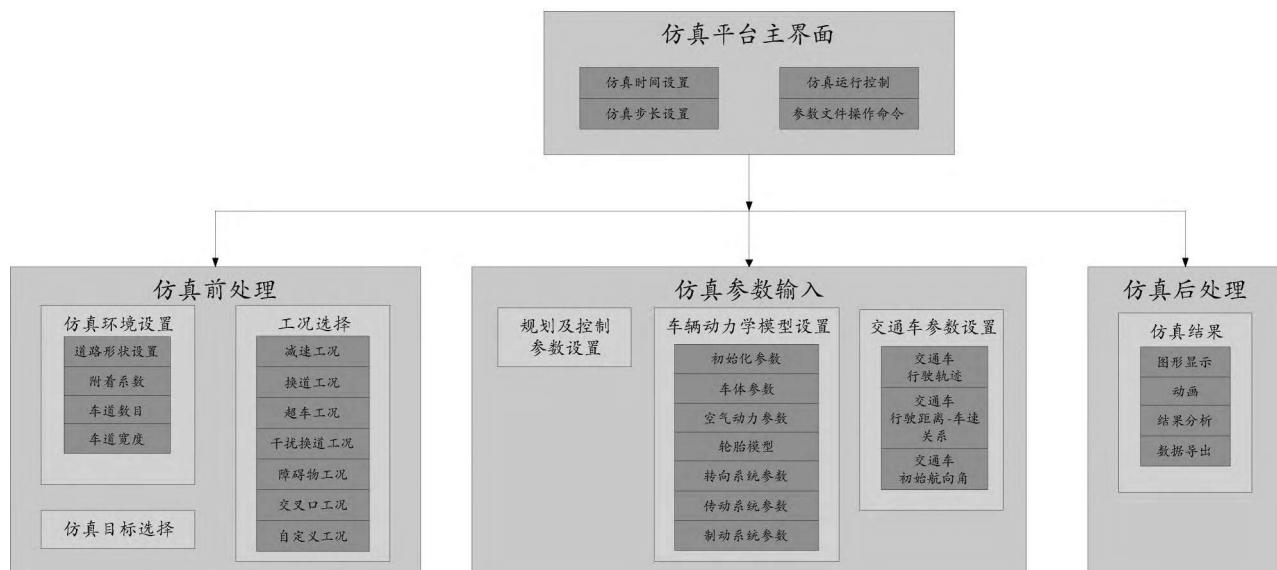


图3 GUI人机交互界面架构

根据大多数研究者的操作习惯及需求,GUI人机交互界面设计了仿真平台主界面、仿真前处理、仿真参数输入、仿真后处理四个主要的界面,各界面下包含不同的参数设置内容及交互命令。

在仿真平台主界面内可以设置仿真时间和步长,控制仿真运行以及操作参数文件;前处理界面可以实现仿真环境的设置、仿真目标以及工况的选择;参数输入界面可以设置主车的车辆动力学参数、交通车的相关参数、规划及控制参数;后处理界面提供了各种数据曲线的绘制功能,并可通过动画方式查看仿真结果。

2 典型仿真工况的定义与设置

日常生活中,车辆行驶时主要会遇到减速、换道、有前方车辆干扰下的换道、超车、交叉口、避障等几种典型行驶工况,这几种工况涵盖了绝大多数车辆的正常行驶工况。以此六种工况作为仿真平台的基本工况,并对其基本属性进行总结如下。

- 1) 减速工况:主车减速直行。
- 2) 换道工况:主车左(右)换道,换道完成后直行。
- 3) 超车工况:主车左(右)换道,进入超车道后直行,超越被超车辆后右(左)换道返回原车道。
- 4) 前方车辆干扰换道工况:主车行为基本与换道工况相同,区别在于由于插入车辆的干扰,主车需进行制动防止发生碰撞。

5) 障碍物工况:主车直行,制动避障。

6) 交叉口工况:在交叉口中,主车行驶需考虑路口车辆的轨迹,通常为减速直行以进行规避,避让后加速通过路口。

为了研究并应对更为复杂的行驶情况,我们对六种基本工况进行了抽象,从中确立了直行、左换道和右换道这三个基础行驶命令元素。几乎任意行驶工况都可以通过对这些命令元素的不同排列组合得到。

在每一种工况下,均可以对仿真所需的参数进行设置,以实现对不同环境、车型、交通状况等仿真条件的准确仿真。

3 汽车安全行驶与避障的仿真实验验证

在这一节中我们以典型工况中较有代表性的超车工况为例详细进行仿真验证结果的分析,并简略介绍自定义工况的仿真结果。

仿真验证时的主车采用了目前业内广泛认可的商业软件CarSim中的D-Class Sedan车辆参数。

3.1 超车工况

利用仿真平台对超车工况进行仿真,并利用后处理模块对结果进行处理,输出动画和曲线,仿真结果分析如下。主车与交通车轨迹如图4所示。

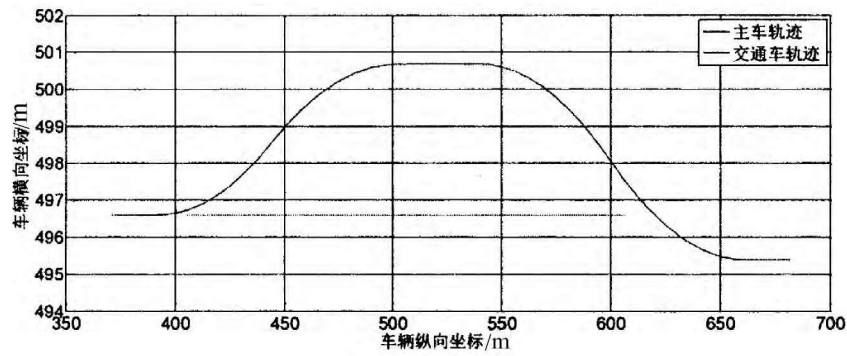


图 4 主车轨迹于交通车轨迹对比

从主车与交通车的运行轨迹可以看出，主车成功实现了
对交通车的超越，并且保证了超车过程的安全性。

主车实际轨迹与期望轨迹对比如图 5 所示。

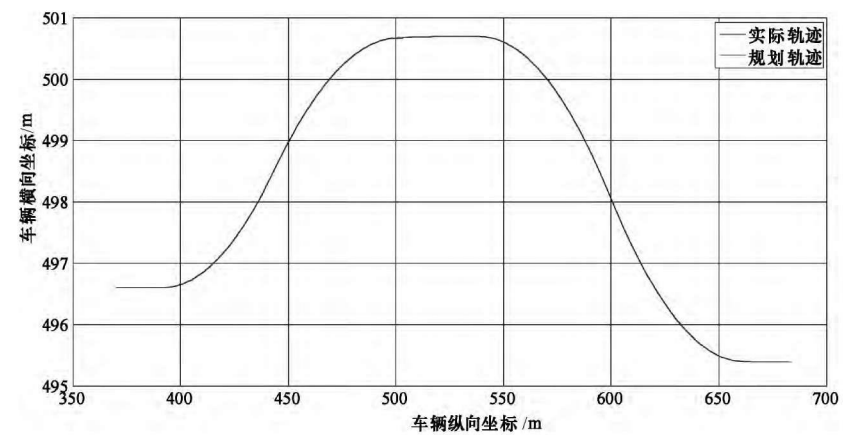


图 5 主车实际轨迹与期望轨迹对比

从图 5 可以看出，主车执行了左换道-直行-右换道的命令
序列，成功实现了与真实车辆十分接近的超车动作，超车轨迹
较为平滑，并且规划出的轨迹与实际跟随的轨迹十分吻合。

主车实际速度与规划速度对比如图 6 所示。

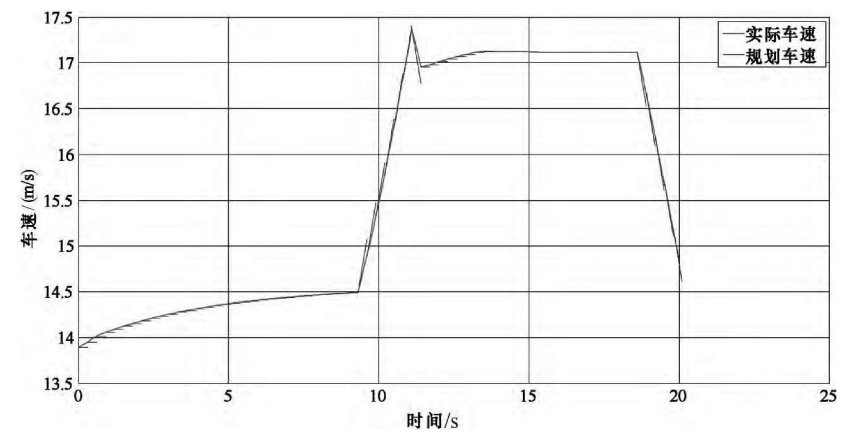


图 6 主车实际速度与规划速度对比

从图 6 可以看出，在仿真模拟中，主车根据超车需要对
车速进行了控制，车速变化符合实际规律，且规划出的速度
与实际车速十分吻合。

仿真平台的后处理程序可输出动画，以更清晰地反映轨

迹规划及跟随过程，动画显示效果如图 7 所示。

从曲线及动画演示中可以看出，主车成功超越了交
通车，轨迹规划及跟随结果正确，证明仿真平台是有
效的。

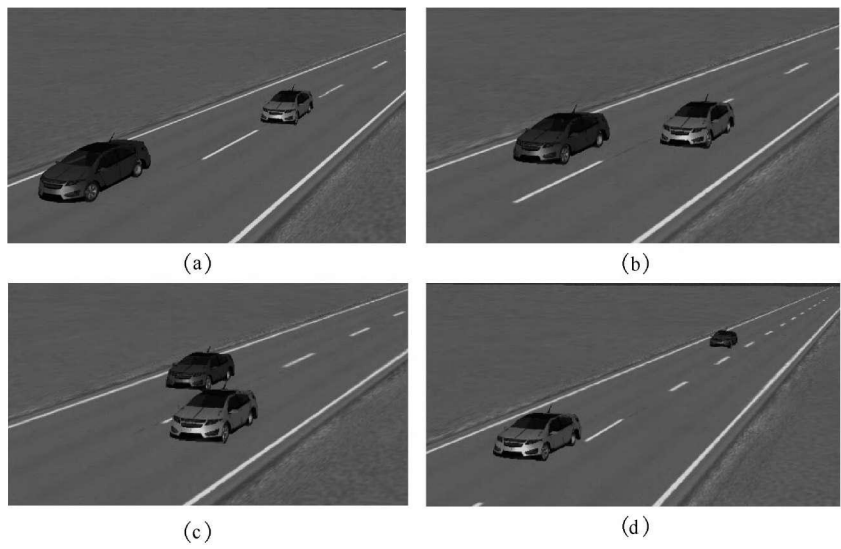


图 7 超车工况动画截图

3.2 自定义工况

设置命令序列为直行-左换道-右换道-左换道-右换道-

直行。交通状况为主车道上有保持匀速行驶的干扰车辆。
图 8 为实际轨迹与规划轨迹对比图。

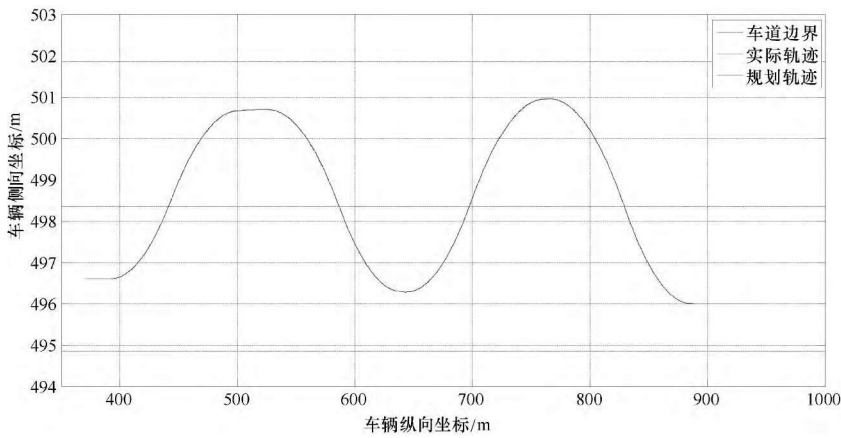


图 8 实际轨迹与规划轨迹对比

从曲线可以看出，主车按照预设的命令序列执行了对交通车的规避动作，证明仿真平台是有效的。

4 总结

本文提出了一种汽车智能化轨迹规划与跟随研究的仿真环境，该仿真环境基于 Matlab/Simulink 进行搭建，扩展性强，可灵活制定系统及界面；源程序开放，可针对复杂计算进行相对简单的编程；支持离线和实时仿真，研发的轨迹规划和跟随算法可无缝移植到车载控制器中。

仿真环境中可对轨迹规划算法及轨迹跟随算法进行替

换，并进行验证及分析。针对智能化轨迹规划及跟随研究的需求，对传感集成、轨迹规划等功能进行了优化，根据使用需求设计了人机图形交互界面，极大地提高了研究的效率。

该仿真环境根据常见车辆行驶工况设计了六种基本行驶工况，并根据对六种基本工况车辆行为的抽象和总结设计了对任意行驶工况的三个基础命令元素，使之适用于对任意复杂行驶工况的轨迹规划和轨迹跟随仿真。仿真结果表明，该仿真平台对于支持汽车智能化行驶中的轨迹规划算法和轨迹跟随控制设计十分有效。

参考文献

[1] 马福良. 智能车规划与控制系统的设计和实现 [D]. 吉林大学, 2012.

[2] Zhang S, Deng W, Zhao Q, et al. Dynamic Trajectory Planning for Vehicle Autonomous Driving [C]. Systems, ?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 4161-4166.

[3] MacAdam C. Application of anOptimal Preview Control for Simulation of Closed-Loop Automobile Driving [J]. Sys-

- tems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 1981, 11 (6): 393-399.
- [4] MacAdam C C. An Optimal Preview Control for Linear Systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980, 102 (3): 188-190.
- [5] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [6] 罗华飞. Matlab GUI 设计学习手记 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.