



教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材

# 智能车辆系统动力学建模与仿真

刘丛志 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书利用大量的仿真实例对智能驾驶车辆动力学建模与仿真所涉及的基本理论及关键技术进行全面论述。本书主要分为两部分,第一部分是基础理论,共6章,第1章主要回顾智能驾驶车辆仿真技术及其发展现状,第2章主要为机电系统建模与仿真基础,第3章主要为智能驾驶车辆动力学建模与控制理论基础,第4章与第5章分别为 MATLAB 和 PreScan 自动驾驶系统仿真基础,第6章为控制系统自动代码生成与半实物仿真技术简介。第二部分是项目实践,共8个项目案例,依次为传感器融合、车辆运动学模型仿真、四轮转向汽车操纵稳定性、自适应巡航控制、自动紧急制动、车道保持辅助、路径跟踪、主动换道避障等系统建模与仿真。

本书可作为车辆工程专业课程教材,也可作为自动化类、电子信息类、计算机类等专业的参考教材,还可供从事智能车辆相关工作的技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能车辆系统动力学建模与仿真/刘丛志编著. —北京:清华大学出版社,2022.11  
教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材  
ISBN 978-7-302-61945-1

I. ①智… II. ①刘… III. ①智能控制—汽车—系统动力学—高等学校—教材 IV. ①U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 181200 号

责任编辑:许 龙  
封面设计:常雪影  
责任校对:赵丽敏  
责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.5

字 数:496千字

版 次:2022年11月第1版

印 次:2022年11月第1次印刷

定 价:65.00元

产品编号:096247-01

电动化、智能化和信息化是汽车技术的发展趋势,而智能驾驶汽车的自动驾驶技术将逐步替代驾驶员简单的驾驶操作,这不仅将改变人们的出行和生活方式,还将变革传统的汽车行业和运输行业。

智能驾驶现已成为未来汽车发展的一大主题,为提高智能驾驶车辆的安全性、可靠性,智能驾驶汽车在真正商业应用之前,需要进行大量的试验验证。但是其作为新兴技术将应用于开放、复杂、不确定的环境,而汽车行驶环境具有的典型随机特征和自然属性往往是不可预测和难以复现的,因此,智能驾驶汽车在试验验证方面仍然面临着非常大的挑战。随着计算机软硬件技术的不断发展,以及物理建模、环境模拟与数值求解等技术的不断成熟,数字化模拟仿真技术被广泛地视为有效解决传统的基于开放道路或封闭试验场测试存在问题的重要手段,也是汽车智能驾驶技术与产品测试、验证和评价的必然途径。基于计算机模拟仿真技术的虚拟仿真测试不仅可复现性好,也具有不受时间、气候和场地限制等优点,且可代替危险性试验,可便捷、自动地调整试验参数,在智能驾驶汽车开发与测试过程中发挥着越来越重要的作用,已成为验证智能驾驶汽车性能不可或缺的技术手段。

在当今全球智能汽车产业大变革的背景下,智能汽车逐步发展为全球创新创业的行业制高点,在教育领域是涉及汽车、电子、通信、自动化等专业交叉的新工科,而目前智能车辆人才短缺并且培养体系不全,因此,将动力学、控制理论、信息技术等应用于车辆工程的重要性日益突出。在燕山大学相关学院的大力支持下,作者团队对智能驾驶微专业建设进行了积极探索,也对相关专业课程、教材进行了同步建设。

本书由刘丛志牵头编写,具体分工如下:第一部分基础理论的第1章、第6章由刘丛志编写,第2~5章由张亚辉编写;第二部分项目实践的车辆运动学模型、四轮转向车辆操纵稳定性仿真项目由张亚辉编写,其余5个仿真项目由刘丛志编写。燕山大学智能运载装备实验室研究生杜志彬、王倩、孙钦葆、董浩然、方睿祺以及聊城大学闫宁、吴健、杜二磊、刘玉杰等为部分章节的编写工作提供了支持,北京林业大学陈绮桐博士也为本书的编写提供了帮助。本书的姊妹篇《智能车辆系统动力学与控制》更加注重基本理论及关键技术知识的梳理。本书得到国家自然科学基金项目(项目批准号52102444)的支持,在此对国家自然科学基金委员会的资助表示感谢。

在本书的编写过程中,编者参考了大量国内外发表的资料,在此向相关作者表示感谢,同时感谢清华大学出版社的大力支持。

由于编者经验不足,水平有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正,我们将不胜感激并持续改进。

作者

2022年5月

清华大学出版社

## 第 1 篇 基础理论

<b>第 1 章 智能驾驶车辆仿真技术概述</b> .....	3
1.1 概述 .....	3
1.2 仿真平台构成 .....	4
1.2.1 传感器建模 .....	5
1.2.2 车辆动力学建模 .....	6
1.2.3 交通场景建模 .....	7
1.3 仿真平台行业现状 .....	9
1.3.1 MATLAB/Simulink .....	11
1.3.2 PreScan .....	15
1.3.3 CarSim/TruckSim/CarMaker .....	17
1.3.4 PanoSim .....	18
1.3.5 Apollo .....	19
1.3.6 Autoware .....	20
1.4 本章小结 .....	21
思考题 .....	21
<b>第 2 章 机电系统建模与仿真基础</b> .....	22
2.1 概述 .....	22
2.2 插值问题 .....	22
2.2.1 拉格朗日插值 .....	23
2.2.2 牛顿插值 .....	24
2.2.3 三次样条插值 .....	26
2.2.4 埃尔米特插值 .....	27
2.2.5 一维插值 .....	29
2.3 拟合问题 .....	30
2.3.1 线性拟合 .....	30
2.3.2 多项式拟合 .....	31

2.3.3	曲线拟合工具箱	32
2.3.4	系统辨识工具箱	34
2.4	方程组求解	39
2.5	微分方程组求解	40
2.6	复杂系统建模方法	42
2.6.1	动态系统建模基础	42
2.6.2	状态空间建模	43
2.6.3	S-函数建模	46
2.6.4	Stateflow 建模	52
2.6.5	Simscape 建模	54
2.7	非线性模型的线性化	60
2.8	混合系统建模基础	63
2.9	本章小结	65
	思考题	65
<b>第 3 章</b>	<b>车辆动力学与控制理论基础</b>	<b>66</b>
3.1	概述	66
3.2	车辆系统模型	66
3.2.1	运动学模型	66
3.2.2	动力学模型	68
3.2.3	轮胎模型	71
3.2.4	轮胎侧偏刚度估计	75
3.3	常用滤波器及其应用	78
3.3.1	低通滤波器	78
3.3.2	卡尔曼滤波器	79
3.4	二次规划及其应用	80
3.4.1	路面附着系数估计	81
3.4.2	车辆行驶曲率估计	84
3.4.3	车辆速度规划	85
3.5	PID 控制	88
3.5.1	模拟 PID 控制	88
3.5.2	数字 PID 控制	89
3.6	线性二次型状态调节器	89
3.7	模型预测控制	90
3.8	本章小结	92
	思考题	92
<b>第 4 章</b>	<b>MATLAB 自动驾驶系统仿真</b>	<b>93</b>
4.1	概述	93

4.2	ADT 主要模块简介	93
4.2.1	驾驶场景模块	94
4.2.2	传感器模块	94
4.2.3	多目标跟踪模块	96
4.2.4	轨迹平滑模块	97
4.2.5	3D 仿真模块	97
4.2.6	车辆动力学模块	98
4.2.7	车辆控制模块	99
4.2.8	自动驾驶模块	100
4.3	自动驾驶场景搭建	101
4.3.1	采用脚本构建场景	101
4.3.2	采用 APP 构建场景	106
4.3.3	采用场景库构建场景	110
4.4	自动驾驶仿真实例	111
4.4.1	视觉检测	111
4.4.2	毫米波雷达目标检测	113
4.4.3	视觉与毫米波雷达融合检测	115
4.4.4	激光雷达检测	119
4.4.5	车辆自动避障	122
4.5	本章小结	124
	思考题	124
<b>第 5 章</b>	<b>PreScan 自动驾驶系统仿真</b>	<b>125</b>
5.1	概述	125
5.2	主要模块简介	125
5.2.1	驾驶场景模块	125
5.2.2	基础设施模块	126
5.2.3	传感器模块	127
5.2.4	车辆模块	129
5.2.5	轨迹设置模块	131
5.2.6	可视化模块	131
5.2.7	其他实用模块	132
5.3	自动驾驶场景搭建	132
5.3.1	采用 GUI 构建场景	132
5.3.2	采用场景库构建场景	134
5.4	本章小结	145
	思考题	145

<b>第 6 章 控制系统自动代码生成与半实物仿真</b> .....	146
6.1 概述 .....	146
6.2 自动代码生成简介 .....	146
6.3 基于 dSPACE 的快速原型开发实例 .....	147
6.3.1 dSPACE 平台介绍 .....	147
6.3.2 环境搭建与自动代码生成 .....	149
6.3.3 ControlDesk 虚拟仪器开发 .....	152
6.3.4 控制器硬件在环仿真 .....	153
6.4 嵌入式开发实例 .....	154
6.4.1 嵌入式硬件介绍 .....	154
6.4.2 环境搭建与自动代码生成 .....	155
6.4.3 FreeMaster 虚拟仪器开发 .....	157
6.4.4 控制器硬件在环仿真 .....	158
6.4.5 控制系统参数标定 .....	158
6.5 本章小结 .....	160
思考题 .....	160

## 第 2 篇 项目实践

<b>项目 1 基于卡尔曼滤波的传感器融合</b> .....	163
P1.1 任务需求 .....	163
P1.2 车辆纵向行驶状态估计 .....	163
P1.2.1 车速与坡度估计 .....	163
P1.2.2 滑移率与道路附着估计 .....	165
P1.3 车辆横向运动状态估计 .....	166
P1.3.1 横向运动速度估计 .....	166
P1.3.2 行驶道路曲率估计 .....	167
P1.4 多目标跟踪 .....	168
P1.4.1 运动模型 .....	168
P1.4.2 数据关联 .....	171
P1.4.3 传感器融合 .....	177
P1.4.4 简单凸联合 .....	178
P1.5 车道线融合检测与跟踪 .....	180
思考题 .....	182
<b>项目 2 车辆运动学模型仿真</b> .....	183
P2.1 任务需求 .....	183
P2.2 运动学模型 .....	183



P2.3	横纵向解耦控制 .....	184
P2.3.1	纵向控制器 .....	184
P2.3.2	横向控制器 .....	185
P2.4	系统闭环仿真 .....	187
	思考题 .....	190
<b>项目 3</b>	<b>四轮转向汽车操纵稳定性 .....</b>	<b>191</b>
P3.1	任务需求 .....	191
P3.2	四轮转向系统原理 .....	191
P3.3	动力学建模与分析 .....	193
P3.3.1	二自由度模型 .....	193
P3.3.2	稳态转向特性 .....	194
P3.3.3	楔形移动特性 .....	196
P3.3.4	前轮转向和四轮转向比较 .....	196
P3.4	PID 控制器 .....	201
P3.5	隆伯格状态观测器 .....	201
P3.6	状态反馈控制器 .....	202
P3.7	闭环系统仿真 .....	203
	思考题 .....	205
<b>项目 4</b>	<b>自适应巡航控制系统 .....</b>	<b>206</b>
P4.1	任务需求 .....	206
P4.2	分层控制策略 .....	207
P4.2.1	目标筛选 .....	207
P4.2.2	安全跟车模型 .....	209
P4.2.3	跟车动力学模型 .....	210
P4.3	控制器设计 .....	211
P4.3.1	LQR 设计 .....	211
P4.3.2	MPC 设计 .....	213
P4.3.3	速度控制 .....	216
P4.3.4	驱动与制动切换控制 .....	218
P4.4	系统仿真 .....	219
P4.4.1	MATLAB ADT 平台仿真 .....	219
P4.4.2	PreScan 平台仿真 .....	223
	思考题 .....	226
<b>项目 5</b>	<b>自动紧急制动系统 .....</b>	<b>227</b>
P5.1	任务需求 .....	227
P5.2	行车安全距离模型 .....	228

P5.3	碰撞时间计算 .....	231
P5.4	控制算法 .....	232
P5.4.1	控制系统需求 .....	233
P5.4.2	最危险目标选取 .....	233
P5.4.3	制动控制策略 .....	235
P5.5	系统仿真 .....	237
P5.5.1	MATLAB ADT 平台仿真 .....	237
P5.5.2	PreScan 平台仿真 .....	241
	思考题 .....	244
<b>项目 6</b>	<b>车道保持辅助系统 .....</b>	<b>245</b>
P6.1	任务需求 .....	245
P6.2	二自由度动力学模型 .....	246
P6.3	控制器设计 .....	248
P6.3.1	自适应预瞄 .....	248
P6.3.2	前馈控制 .....	248
P6.3.3	LQR 设计 .....	252
P6.3.4	MPC 设计 .....	253
P6.3.5	$H_{\infty}$ 控制器设计 .....	256
P6.4	系统仿真 .....	258
P6.4.1	MATLAB ADT 平台仿真 .....	258
P6.4.2	PreScan 平台仿真 .....	263
	思考题 .....	269
<b>项目 7</b>	<b>路径跟踪系统 .....</b>	<b>270</b>
P7.1	任务需求 .....	270
P7.2	运动学方法 .....	271
P7.2.1	PID 控制 .....	271
P7.2.2	Stanley 控制 .....	272
P7.2.3	纯跟踪控制 .....	273
P7.2.4	Alice 控制 .....	274
P7.3	动力学方法 .....	277
P7.3.1	LQR 控制 .....	277
P7.3.2	MPC 控制 .....	279
P7.4	系统仿真 .....	282
P7.4.1	MATLAB ADT 平台仿真 .....	282
P7.4.2	PreScan 平台仿真 .....	285
	思考题 .....	290

<b>项目 8 主动换道避障系统</b> .....	291
P8.1 任务需求 .....	291
P8.2 换道避障决策 .....	292
P8.2.1 换道时机决策 .....	292
P8.2.2 换道时间决策 .....	297
P8.3 换道路径规划 .....	301
P8.3.1 Frenét 坐标系 .....	301
P8.3.2 五次多项式路径规划 .....	301
P8.4 优化目标 .....	302
P8.5 约束条件 .....	306
P8.6 二次规划 .....	308
P8.7 系统仿真 .....	310
思考题 .....	314
<b>参考文献</b> .....	315

清华大学出版社

第 1 篇

# 基础理论

清华大学出版社

清华大学出版社

## 智能驾驶车辆仿真技术概述

### 1.1 概 述

电动化、智能化和信息化是汽车技术的发展趋势,而智能驾驶汽车的自动驾驶系统将逐步替代驾驶员简单的驾驶操作,这不仅将改变人们的出行和生活方式,还将变革传统的汽车行业和运输行业。智能驾驶汽车的普及将有利于减少交通事故的发生,提高道路利用率和通行效率,实现车辆的安全高效行驶。

智能驾驶汽车是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置,具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能,可实现车辆“安全、高效、舒适、节能”行驶,并最终实现替代驾驶员操作的新一代汽车。

智能驾驶系统主要包括环境感知模块、定位模块、人机交互模块、规划决策模块、控制模块及 V2X(vehicle-to-everything)模块等,其系统架构图如图 1.1 所示。智能驾驶系统是一个高度智能化的复杂系统,其感知模块和定位模块通过多传感器实现车辆周围环境的准确理解、自身高精度定位,并将感知信息传至规划决策模块。规划决策模块根据输出信息合理决策当前车辆的行为,并根据不同的行为确定轨迹规划的约束条件,指导轨迹规划模块规划出合适的路径、车速等信息,并将车辆数据及控制命令传至控制层。控制模块负责将决策和规划落实为切实可行的车辆动作,通过线控底盘完成制动、驱动、转向及其他操作行为,实现对目标车速、路径等进行高精度跟踪。

智能驾驶现已成为未来汽车发展的一大主题,然而自动驾驶车辆时有事故发生,让人们对自动驾驶憧憬的同时也心存顾虑。安全性难以保证、系统可靠性差是阻碍智能驾驶汽车发展的重要原因,因此,为提高智能驾驶车辆的安全性、可靠性,智能驾驶汽车在真正商业应用之前,需要进行大量的试验验证。但是其作为新兴技术将应用于开放、复杂、不确定的环境,而汽车行驶环境具有的典型随机特征和自然属性往往是不可预测、难以复现的,因此,智能驾驶汽车在试验验证方面仍然面临着非常大的挑战。

随着计算机软硬件技术的不断发展,以及物理建模、环境模拟与数值求解等技术的不断成熟,数字化模拟仿真技术被广泛地视为有效解决传统的基于开放道路或封闭试验场测试存在问题的重要手段,也是汽车智能驾驶技术与产品测试、验证和评价的必然途径。基于计算机模拟仿真技术的虚拟仿真测试不仅可复现性好,也具有不受时间、气候和场地限制等优点,且可代替危险性试验,可便捷、自动地调整试验参数,从而缩短开发周期、提高效率、降低成本、保障测试安全,在智能驾驶汽车开发与测试过程中发挥着越来越重要的作用,已成为验证智能驾驶汽车性能不可或缺的技术手段。

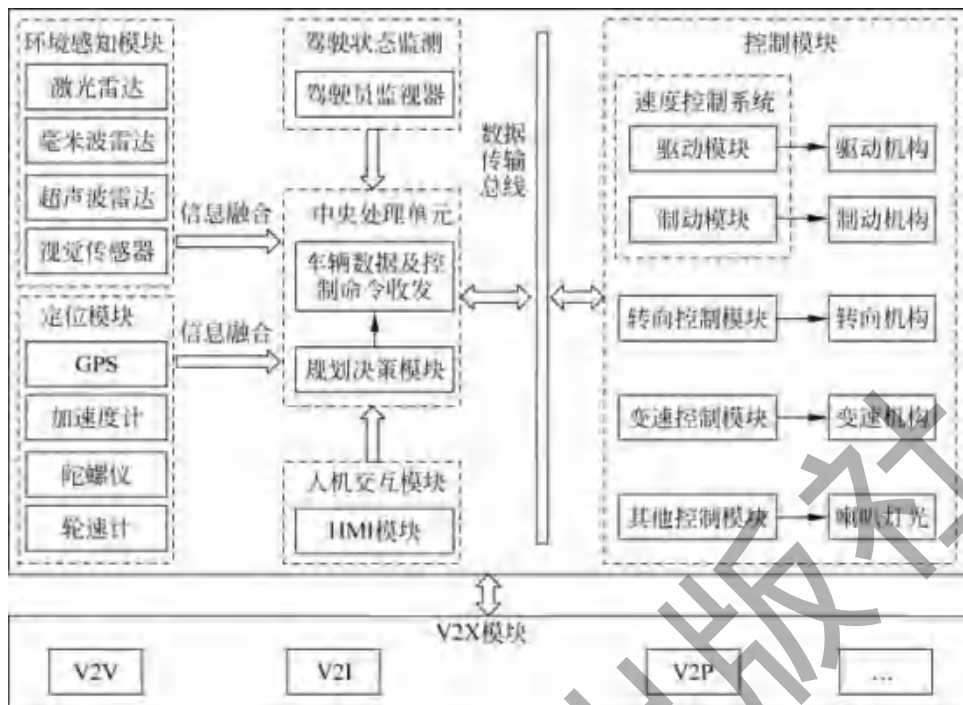


图 1.1 智能驾驶车辆系统架构图

目前自动驾驶算法测试大约 90% 通过仿真平台完成, 9% 在测试场完成, 1% 通过实际路测完成。普通场景下的自动驾驶算法已经比较完善, 突破难点在于一些极端场景下的性能测试。这些场景可以通过仿真平台便捷生成, 进行针对性的测试和验证。为解决极端场景测试难题, 业界共识要加大仿真测试在自动驾驶测试中的占比。随着仿真技术水平的提高和应用的普及, 业界旨在达到通过仿真平台完成 99.9% 的测试量, 封闭场地测试 0.09%, 最后 0.01% 到实路上去完成, 这样可以使自动驾驶汽车研发达到更高效、更经济的状态。

## 1.2 仿真平台构成

智能驾驶汽车仿真技术是指通过传感器建模、车辆动力学建模、高级图像处理、交通场景仿真、道路建模等技术模拟智能汽车人-车-路闭环系统, 对智能驾驶汽车功能和性能进行测试, 并据此对智能汽车进行评价分析。智能驾驶仿真具有以下优点: 仿真环境搭建方便、测试场景重复性好、无测试安全性问题、测试效率高、节约成本。

自动驾驶仿真测试平台必须具备几种核心能力: 真实还原测试场景的能力、高效利用路采数据生成仿真场景的能力、云端大规模并行加速的能力, 并能够较容易接入自动驾驶系统, 使得仿真测试满足自动驾驶感知、决策规划和控制等全栈算法的闭环, 符合汽车 V 字开发流程, 以达到持续迭代和优化的状态。

智能驾驶车辆仿真平台的典型构成如图 1.2 所示, 最核心的三个部分分别是传感器建模、车辆动力学建模、交通场景建模, 以下针对这三部分重点进行介绍。



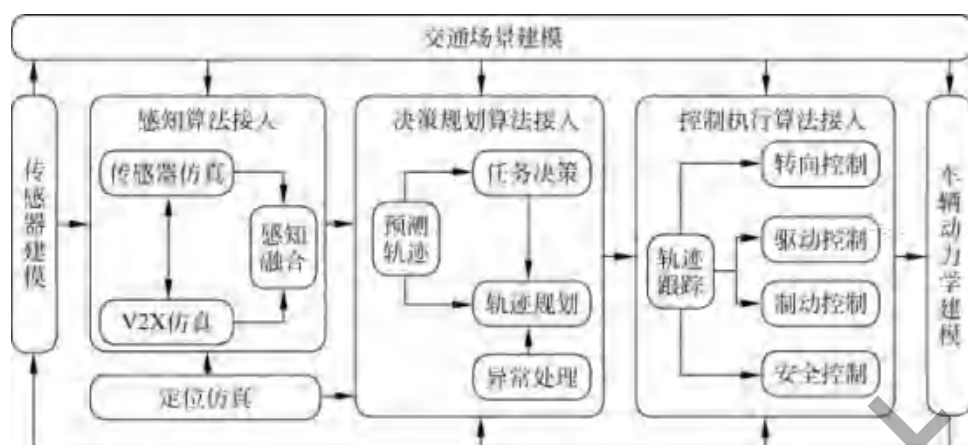


图 1.2 智能驾驶汽车仿真系统

### 1.2.1 传感器建模

环境感知系统在智能驾驶汽车技术架构中处于首要位置,在感知→决策→控制执行的技术架构中,首先需要通过雷达、摄像头、定位装置等感知传感器收集必要的车辆行驶环境信息,才能对车辆的环境有较准确、全面的理解,从而进行后续的决策与控制。因此,在智能车辆仿真测试的过程中搭建精确的环境感知传感器模型十分重要。

环境感知传感器的建模需要对传感器物理原理的大量先验知识和经验进行模拟。传感器仿真包括三个不同层级的仿真:

**物理信号仿真:**就是直接仿真传感器接收到的信号,如摄像头,直接仿真摄像头检测到的光学信号;雷达,直接仿真声波和电磁波信号。

**原始信号仿真:**即把传感器的探测单元拆掉,因为控制电控嵌入系统中有专门的数字处理芯片,可以直接仿真数字处理芯片的输入单元。

**目标级信号仿真:**目标级输入信号一般是控制器局域网(controller area network, CAN)总线输入信号或者其他通信协议格式输入信号。比如差分 GPS 和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)可以通过串口通信来仿真。

摄像头仿真就是生成逼真的图像,通过计算机图形学对三维景物(CAD)模型添加颜色与光学属性。现在流行的 Unreal Engine 或者 Unity 3D,就是基于物理的渲染引擎,实现一些 CAD 模型的绘制算法,比如光线跟踪(ray tracing)或者光线投射(ray casting),来实现图像合成。一些开源的自动驾驶仿真系统比如 Intel Carla 和 Microsoft AirSim 都采用了这些渲染引擎。

对车载激光雷达进行建模的目的是在虚拟驾驶环境中使用虚拟的激光雷达点云数据,以得到类似真实激光雷达的、可以用于汽车控制的虚拟驾驶环境信息。由于车载激光雷达的主要功能是对环境和目标的检测,想要模拟车载激光雷达的功能,也需要对环境和目标进行合理的建模。环境模型主要用来描述环境中激光传输的介质对探测的影响。目标模型描述了目标的形状及其反射特性。考虑到激光雷达在探测环境中的目标时可以产生空间信息以及能量信息,可使用几何模型和物理模型共同描述激光雷达的探测过程。

毫米波雷达模型分成几何模型和物理模型两部分。几何模型属于功能性建模,模拟理

想雷达的功能,不考虑实际雷达探测目标的具体机理,将其发射的电磁波束抽象成圆锥体,与搜索空域内的目标物体特征点集求交并输出。物理模型在几何模型的基础上,通过模拟实际雷达信号的处理流程和添加噪声,使毫米波雷达模型更接近真实情况。

超声波传感器是早期阶段车辆的主要外界感知硬件,由于其能够探测车辆周围障碍物的特性,被广泛应用于倒车雷达和盲区监测。40kHz 和 58kHz 是使用最广泛的车载传感器频段。超声波传感器与毫米波雷达和激光雷达不同的地方在于它发出的是声波,因此能够检测一些透明的障碍和具有高反射特性表面的障碍物,这些障碍物对基于电磁波检测原理的毫米波雷达和激光雷达来说,都具有很高的检测难度。超声波传感器的建模不仅需要考虑传感器本身的特性,还要对传输介质和目标进行精确建模,因此整个建模分为三个部分:传感器本身特性建模、传输介质建模、目标物体特性建模。

### 1.2.2 车辆动力学建模

车辆动力学在汽车设计和开发过程中扮演着重要角色,主要研究汽车受力与运动之间的关系,并分析汽车性能的内在联系和规律。车辆动力学建模方法一般包括集中参数模型、动力子结构模型、多刚体系统动力学模型、有限元模型等,不同的应用场景其建模方法也有所不同,甚至车辆动力学模型可以是低阶的线性模型,也可以是高阶的非线性模型。在车辆动力学建模与仿真中,需要实现车体模型、轮胎模型、制动系统模型、转向系统模型、动力系统模型、传动系统模型、空气动力学模型、硬件 I/O 接口模型等各模块的参数化,根据实际测试车辆的动力学配置合适的参数,以保证车辆的仿真精度足够高,使被控对象更接近真实的对象。

一般来说,车辆动力学是研究所有与车辆系统运动有关的学科。它涉及的范围很广,包括车辆纵向运动及其子系统的纵向动力学(如发动机、传动、加速、制动、防抱死和牵引力控制系统等方面),还有车辆在垂向和侧向两个方面的动力学内容,即行驶动力学和操纵动力学。行驶动力学主要研究由路面的不平激励,通过悬架和轮胎垂向力引起的车身跳动和俯仰以及车轮的运动;而操纵动力学研究车辆的操纵特性,主要与轮胎侧向力有关,并由此引起车辆侧滑、横摆和侧倾运动。

长期以来,科研人员一直习惯按纵向、垂向和横向分别独立研究车辆动力学问题;而实际中的车辆同时会受到三个方向的输入,各方向所表现的运动响应特性必然是相互作用、相互耦合的,如图 1.3 所示。例如转向过程中,路面在给车辆提供侧向力的同时,也通过悬架给车辆提供垂向输入干扰。悬架的作用除支撑车辆、隔离路面干扰外,还将控制转向时的车身姿态,并传递来自轮胎的力。反过来看,同样的车身运动既可由行驶输入引起,如路面不平引起的车身侧倾,也可由操纵方面引起,如转向时引起的车身侧倾。此外,利用不同车轮纵向力控制来改善极限工况下的车辆稳定性控制系统(vehicle stability control, VSC)也是一个典型的例子。

事实上,将车辆横向、纵向、垂向的动力学问题分开处理的动机可能很实际,主要是为了减少模型的自由度,从而减少分析工作量,使问题更易于处理。当然,如果对车辆的工作状况及条件进行适当限制,那么三个方向的耦合关系则可能不太显著。例如,当车辆在水平粗糙路面匀速直线行驶时,问题将集中在行驶动力学特性方面;当车辆在水平路面匀速转弯行驶时,那些主导操纵性能的力和运动对纵向和垂向特性则无显著影响。

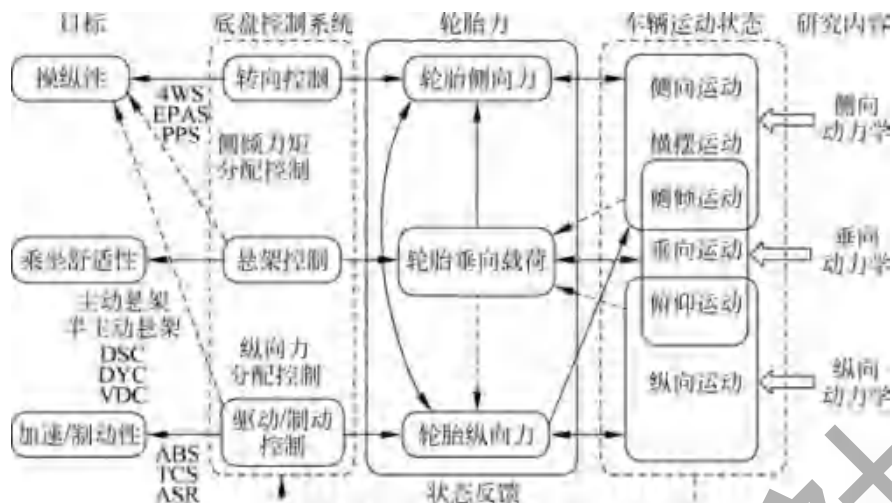


图 1.3 车辆动力学研究内容

### 1.2.3 交通场景建模

目前基于场景库的仿真测试是解决自动驾驶路测数据匮乏的重要路线。仿真测试主要通过构建虚拟场景库,实现自动驾驶感知、决策规划、控制等算法的闭环仿真测试,满足自动驾驶测试的要求。场景库是自动驾驶仿真测试的基础,场景库对现实世界的覆盖率越高,仿真测试结果越真实。而且自动驾驶汽车研发的不同阶段对于场景库的要求也不同,需要场景库实现不同的测试功能。自动驾驶测试场景一般可分为自然驾驶场景、危险工况场景、标准法规场景、参数重组场景等四大类,四类场景共同组成了场景库。

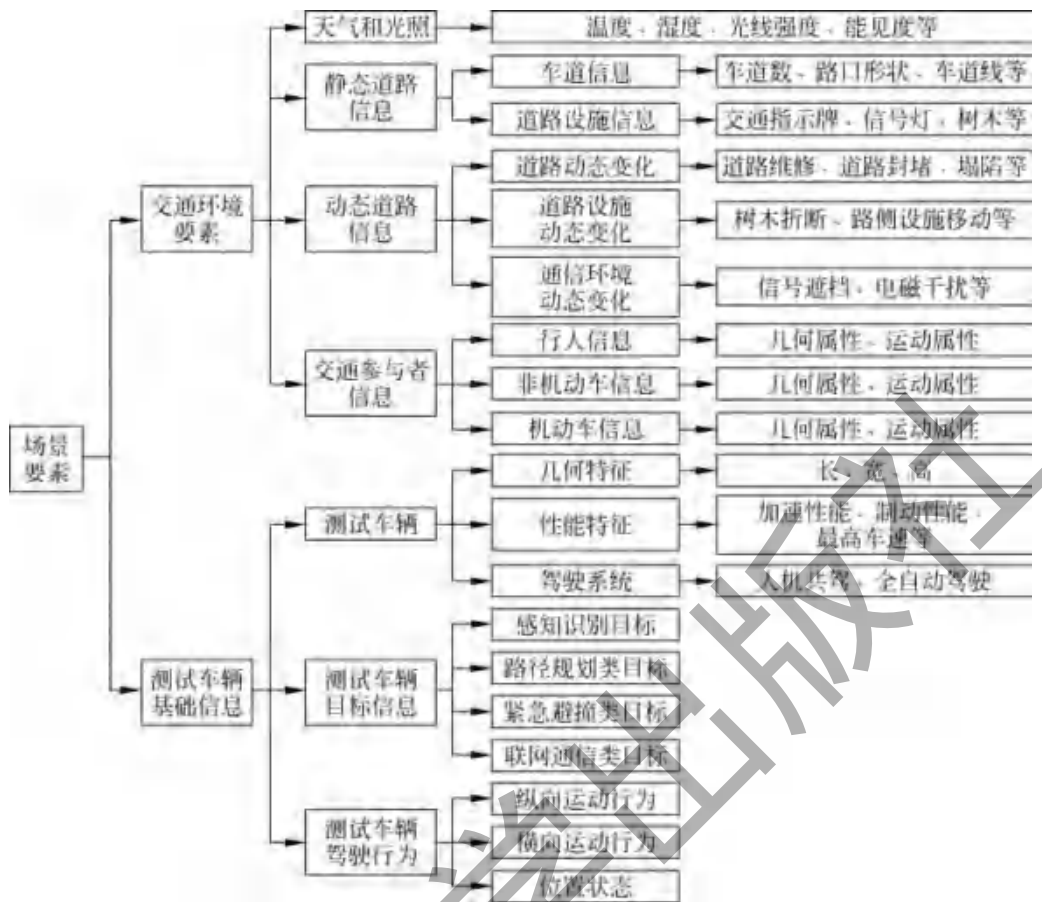
汽车行驶场景是道路、交通与气象等诸多要素的集合,是影响乃至决定智能汽车性能与安全的关键因素,具有高度的不确定、不可重复、不可预测和不可穷尽等特征。这些特征使得有限的场地或道路测试远远无法复制、重现或穷举行驶环境对智能汽车的影响,难以满足系统的可靠性和鲁棒性要求。因此,丰富且具有较强确定性的汽车行驶场景建模技术,是智能汽车研发、测试与评价的关键保障技术,对于提高系统性能、保障安全性、实现友好人机交互体验等均具有十分重要的意义。

交通场景是汽车行驶环境的抽象,是反映汽车智能驾驶外部影响因素与信息的集合;它包含一定时间和空间范围内影响车辆运行状态和轨迹的周边环境要素,如道路、气象、静止与动态交通参与物等诸多因素。测试场景的要素可以分为测试车辆基础信息与交通环境要素两大类,具体要素内容如图 1.4 所示。

#### 1. 测试车辆基础要素

智能驾驶汽车在测试过程中,测试车辆本身会对周围场景要素尤其是其他交通参与者产生明显的影响,测试车辆和周围驾驶环境之间相互作用形成闭环,因此测试车辆基础信息是测试场景要素中不可或缺的部分,其主要包括固有状态、目标信息、驾驶行为。

测试车辆的固有状态会对自动驾驶系统的行为决策起到关键影响,例如测试车辆的几何特征、性能特征、驾驶系统等。测试车辆的几何特征会决定其安全空间,几何尺寸越大,其所需的安全空间也就越大;测试车辆的性能特征会决定其行驶策略,以加速性能为例,不同



的加速性能会决定驾驶系统选择不同的行驶模式，例如跟随或是超车；测试车辆的驾驶系统会决定驾驶人是否可实时参与到车辆驾驶行为之中，一旦发生意外情况，是由驾驶人进行接管还是驾驶系统进行保守型操作。测试车辆目标信息即为测试车辆的驾驶任务，会影响测试场景的覆盖范围及测试场景的持续时间。测试车辆驾驶行为指测试车辆当前的运动状态，例如当前的纵向速度、侧向速度等，明确测试车辆当前的驾驶状态是进行下一步路径规划和车辆控制的基础。

## 2. 交通环境要素

交通环境要素主要包含天气与光照要素、静态道路信息、动态道路信息、交通参与者信息。天气与光照要素会影响智能汽车的感知系统，例如逆光或顺光、光照的不同亮度、雾霾、雪等都会对雷达或者摄像头等产生影响；静态道路信息是场景要素的基础，从广义上来说，智能汽车都是在道路上行驶，在行驶的过程中，智能汽车还需要遵循一定的交通规则；动态道路信息会极大地提升行驶场景的复杂程度，增加智能汽车决策的困难；其他交通参与者信息包括行人信息、非机动车信息和机动车信息，在真实的行驶环境中，其他交通参与者具有很大的不确定性，其下一时刻的运动状态与其驾驶人息息相关，根据其当前状态合理地预估其下一步状态，是决策系统的重要任务。

在明确场景要素种类之后，可以结合智能汽车行驶场景的具体特点，对智能汽车的行驶

场景进行构建。构建的主要内容有：基于模型和图像的混合建模，包括支持对车载摄像头、视觉成像和图像处理等的模拟和仿真；复杂气象模拟，包括风、雨、雪、雾、冰雹等对雷达电磁波传播和图像成像的影响；场景静态要素模拟，包括汽车行驶道路和道路网络拓扑结构、数字地图、GPS 导航、交通标志信号、标志设施模拟等；场景动态要素模拟，包括车辆、行人、非机动车的交通路况模拟；车联网建模，包括 V2V 车载无线通信信道和 V2I 联网的无线路由及无线通信网络等关键技术的建模。

在构建场景的过程中，首先应该对行驶场景中的道路进行建模。在道路模型中，一般对车道、道路属性进行设置，对多车道、路口、出口斜坡、超高、弯曲、路面摩擦、道路交通标志、交通灯、限速标志、停车标志等进行设定，还应该能够自定义路面标志线，包括实线、虚线、停车位、不规则几何线段，并可进行不平度设置和各种道路细节设定，甚至还应该可以完成桩桶、井盖、路面凸起、路肩、人行道、曲线规则栅格路面(curved regular grid, CRG)数据的导入等功能，如图 1.5 所示。

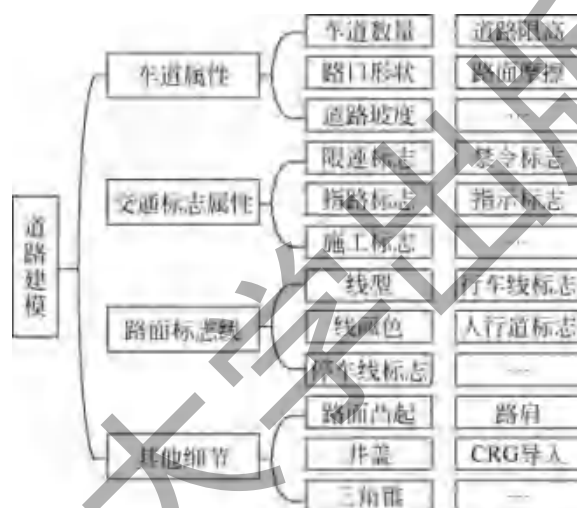


图 1.5 道路建模细节

### 1.3 仿真平台行业现状

随着智能网联汽车的快速发展，特别是无人驾驶技术已经成为未来汽车的发展方向，有关汽车自动驾驶仿真软件也出现爆发式增长，这些仿真软件有从传统汽车动力学仿真软件演化而来的，也有国内外初创公司推出的仿真新产品。各种自动驾驶仿真软件都有其各自的特点和优势，随着仿真技术的发展，搭建一个完整的仿真系统也越来越需要多个软件互相之间的配合。典型的自动驾驶仿真软件或平台应包括以下内容：

- (1) 能够构建各种驾驶场景，而且能使这种驾驶场景越来越逼真。
- (2) 能够仿真各种传感器，包括摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达等。
- (3) 具有车辆动力学模型，可以对先进驾驶辅助系统(ADAS)或自动驾驶车辆进行仿真。
- (4) 支持传感器融合、多目标跟踪、路径规划和车辆控制算法等。
- (5) 支持 C/C++ 自动代码生成，实现快速原型和硬件在环测试。

目前,包括科技公司、车企、自动驾驶方案解决商、仿真软件企业、高校及科研机构等主体都在积极投身虚拟仿真平台的建设。在全球主流自动驾驶仿真软件企业中,美国和德国占据全球企业总数一半以上。通过表 1.1 可以发现,在 22 家仿真软件企业中,有 8 家来自美国,占总数的 36%,显示了美国在自动驾驶领域的世界领先地位。来自德国的有 7 家,占总数的 32%,主要是德国在传统仿真软件领域的坚实基础促进了自动驾驶仿真的发展。中国有 3 家自动驾驶仿真软件初创企业,虽然在汽车传统仿真领域存在短板,在自动驾驶仿真方面积累薄弱,但依靠雄厚的资金和人才集聚力,在自动驾驶仿真软件研发方面迅速崛起。

表 1.1 典型自动驾驶仿真软件简介

分类	企业名称	仿真软件	国家	成立时间	应用特点
传统仿真软件企业	MSC	Adams、VTD	美国	1963	Adams: 多体动力学仿真,可分析车辆系统性能; VTD: 可生成复杂道路网及交通场景,用于 ADAS、主动安全和驾驶模拟器
	ANSYS	ANSYS、Optis	美国	1970	ANSYS: 可自定义道路、交通场景、交通流以及车辆动力学参数,实现多传感器、多交通对象、多场景、多环境的实时闭环仿真; Optis: 可搭建逼真虚拟现实和闭环仿真平台,实现高质量光学仿真
	ESI	ESI Pro-Sivic	法国	1973	可实现场景编辑,快速定义出危险或典型用户案例,可建立高通真 3D 场景,实现传感器仿真
	IPG	Carmaker、TruckMaker	德国	1984	CarMaker: 可应用于各种车辆的动力学仿真,车辆参数可任意设定; TruckMaker: 可应用于卡车及大型客车的动力学仿真
	MathWorks	MATLAB/Simulink	美国	1984	实现系统建模、感知算法、路径规划算法、控制算法、数学分析、自动代码生成等
	Mechanical Simulation	CarSim	美国	1996	支持 SIL、MIL、HIL、DIL 仿真及动力学仿真,包含 10 余种车型的数据集,安装方便易操作
	Mentor	DRS360	德国	1981	仿真系统效率高、成本低,可提供 AD 及 ADAS 仿真服务,具备支持 L5 级自动驾驶的能力
	Oktal	SCANeR Studio	法国	1989	可扩展开放式模块化仿真解决方案,创建极为逼真的虚拟世界
	PTV	PTV Vissim	德国	1979	专注微观交通流仿真,可对车辆和行人等交通参与者及不同交通方式进行交互式仿真
	Quantum Signal AI	ANVEL	美国	1999	支持快速构建虚拟车辆模型,实时仿真及算法开发
	rFpro	rFpro	英国	2007	可提供多样化的公共道路、天气、气候、照明模型,支持动力学、ADAS、自动驾驶系统仿真
	TESIS	TESIS	德国	1988	支持 Simulink、RSIM、NI 等多种仿真平台,可构建复杂的 3D 道路模型,支持传感器仿真,具备自动测试并生成测试报告功能
	VI-grade	VI-grade	德国	2005	基于 Adams 软件技术,支持 SIL、HIL 及车辆动力学仿真,实时测试及优化汽车性能及车辆动态控制器

续表

分类	企业名称	仿真软件	国家	成立时间	应用特点
初创企业	AAI	AAI	德国	2017	利用人工智能训练产生攻击型、温和型、防御型交通参与者以及现实世界的各种环境
	Cognata	Cognata	以色列	2016	利用人工智能、深度学习和计算机视觉模拟创建真实的交通流量环境和交通模型
	Metamoto	Metamoto	美国	2016	支持传感器仿真、场景编辑,提供云仿真服务(simulation as a service),通过测试边缘场景增加系统可靠性
	Parallel Domain	Parallel Domain	美国	2017	支持各种模型的传感器、动态场景、数据接口以训练自动驾驶系统算法
	RightHook	RightHook	美国	2016	支持高精地图自动重建虚拟场景,交通参与者模型,以及天气、动力学和传感器模拟
	Tass International	PreScan	德国	2013	支持 ADAS 仿真,环境仿真以及 MIL、SIL、HIL 仿真,可设计和评估 V2X、V2I 等通信
	PanoSim	PanoSim	中国	2014	支持场景、车辆、传感器编辑,可进行道路、交通、天气、光照等环境仿真
	沛岱汽车	Pilot-D GaiA	中国	2010	支持路面构建、交通参与者生成、自动测试、天气重现、实时绘制测试车辆数据及多台自动驾驶车辆的交互式仿真
	51WORLD	51Sim-one	中国	2015	可进行大规模城市级仿真及加速仿真,支持 OpenX 标准格式动静态场景

以下重点介绍几种典型的自动驾驶仿真软件。

### 1.3.1 MATLAB/Simulink

MATLAB 的名称源自 Matrix Laboratory,它是一种科学计算软件,专门以矩阵的形式处理数据。MATLAB 将高性能的数值计算和可视化集成在一起,并提供了大量的内置函数,从而被广泛地应用于科学计算、控制系统、信息处理等领域的分析、仿真和设计工作。

MATLAB 由主程序、Simulink 动态仿真系统和 MATLAB 工具箱等组成。其中主程序包括 MATLAB 语言、工作环境以及应用程序; Simulink 动态仿真系统是一个相互交互的系统,用户制作一个模拟系统,并进行动态控制;而工具箱就是 MATLAB 基本语句的各种子程序和函数库。工具箱又可以分为功能性和学科性工具箱。功能性的工具箱主要用于扩展 MATLAB 的符号计算功能、图形建模功能、文字处理功能和与硬件的实时交互过程,如符号计算工具箱等;学科性的工具箱则有较强的专业性,用于解决特定的问题,如信号处理工具箱、通信工具箱和控制系统工具箱等。

MATLAB 具有高效的数值计算及符号计算功能,能使用户从繁杂的数学运算分析中解脱出来;具有完备的图形处理功能,实现计算结果和编程的可视化;友好的用户界面及接近数学表达式的自然化语言,使学习者易于学习和掌握;功能丰富的应用工具箱(如数据拟合工具箱、系统辨识工具箱、控制系统工具箱、自动驾驶工具箱等),为用户提供了大量方便实用的处理工具。MATLAB 界面如图 1.6 所示。

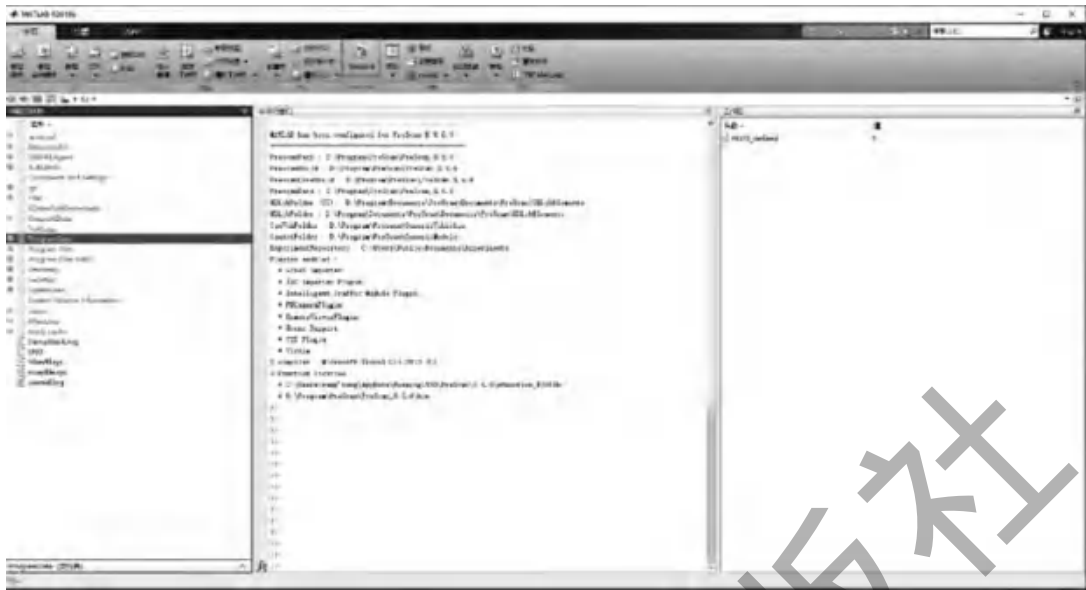


图 1.6 MATLAB 界面

Simulink 是 MATLAB 中的一种可视化仿真开发工具,是一种基于 MATLAB 的框图设计环境,是实现动态系统建模、仿真和分析的一个软件包,被广泛应用于线性系统、非线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中。Simulink 可以用连续采样时间、离散采样时间或两种混合的采样时间进行仿真,它也支持多速率系统,也就是系统中的不同部分具有不同的采样速率。为了创建动态系统模型,Simulink 提供了一个建立模型方块图的图形用户接口(GUI),这个创建过程只需单击和拖动鼠标操作就能完成,它提供了一种更快捷、直接明了的方式,而且用户可以立即看到系统的建模与仿真结果。

基于 MATLAB/Simulink 强大的数据处理能力,其自动驾驶工具箱提供了用于设计、仿真和测试 ADAS 以及自动驾驶系统的算法和工具。自动驾驶工具箱提供了常见 ADAS 的参考应用示例和自动驾驶功能,包括前向碰撞预警(FCW)、自动紧急制动(AEB)、自适应巡航控制(ACC)、车道保持辅助(LKA)和自动泊车(APA),该工具箱支持 C/C++ 自动代码生成,实现快速原型和硬件在环测试,同时还支持传感器融合、多目标跟踪、路径规划和车辆控制算法等应用级功能开发。MATLAB 自动驾驶工具箱主要包括以下功能。

### 1. 可视化工具

支持以下典型可视化任务:

- (1) 显示摄像机视频。
- (2) 显示雷达和视觉鸟瞰图。
- (3) 显示车道线标记。
- (4) 显示激光雷达点云。
- (5) 显示道路地图数据。
- (6) 多个坐标系之间的变换。
- (7) 到 ROS 的实时连接和记录数据的回放。
- (8) 到 CAN 总线的实时连接和记录数据的回放。



(9) 到激光雷达的实时连接和记录数据的回放。

如图 1.7 所示为利用摄像机跟踪多目标车辆的可视化结果。



图 1.7 利用摄像机跟踪多目标车辆

## 2. 构建自动驾驶场景并模拟传感器特性

支持以下典型驾驶构建任务：

- (1) 以编程方式构建驾驶场景。
- (2) 通过图形化界面构建驾驶场景。
- (3) 从场景库中构建驾驶场景。
- (4) 模拟雷达、视觉传感器等传感器的检测。
- (5) 将场景集成到车辆控制的闭环仿真。
- (6) 结合 Unreal 游戏引擎的仿真测试。

图 1.8 所示为构建的自动驾驶场景。

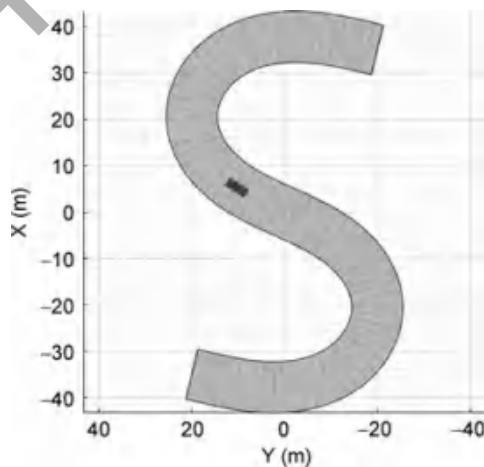


图 1.8 自动驾驶仿真场景图

### 3. 开发自动驾驶感知系统

支持以下典型自动驾驶感知系统开发任务：

- (1) 传感器数据标注。
- (2) 训练深度学习网络。
- (3) 设计雷达检测与跟踪算法。
- (4) 设计视觉传感器检测与跟踪算法。
- (5) 设计激光雷达检测与跟踪算法。
- (6) 设计传感器融合与多目标跟踪算法。
- (7) 生成 C/C++ 代码。
- (8) 生成 GPU 代码。

利用摄像机实现多目标跟踪结果(见图 1.7)。

### 4. 开发自动驾驶规划系统

支持以下典型自动驾驶规划开发任务：

- (1) 地图可视化。
- (2) 提供高精地图接口。
- (3) 处理占据栅格地图。
- (4) 设计融合定位算法和同步定位与建图 SLAM 算法。
- (5) 设计车辆运动规划算法。
- (6) 生成 C/C++ 代码。

图 1.9 所示为自动泊车路径规划仿真场景。

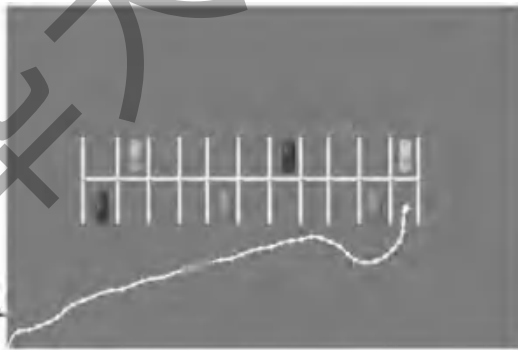


图 1.9 自动泊车路径规划仿真场景

### 5. 开发自动驾驶控制系统

支持以下典型自动驾驶控制系统开发任务：

- (1) 设计车辆纵向与横向模型预测控制器。
- (2) 设计基于强化学习和深度学习的控制器。
- (3) 开发环境感知算法、决策与规划算法、车辆动力学控制模型。
- (4) 实时硬件快速原型。

- (5) 生成产品级 C/C++ 代码。
- (6) 生成 AUTOSAR 标准代码。
- (7) 功能安全 ISO 26262 认证。

图 1.10 所示为横向控制的仿真模型。

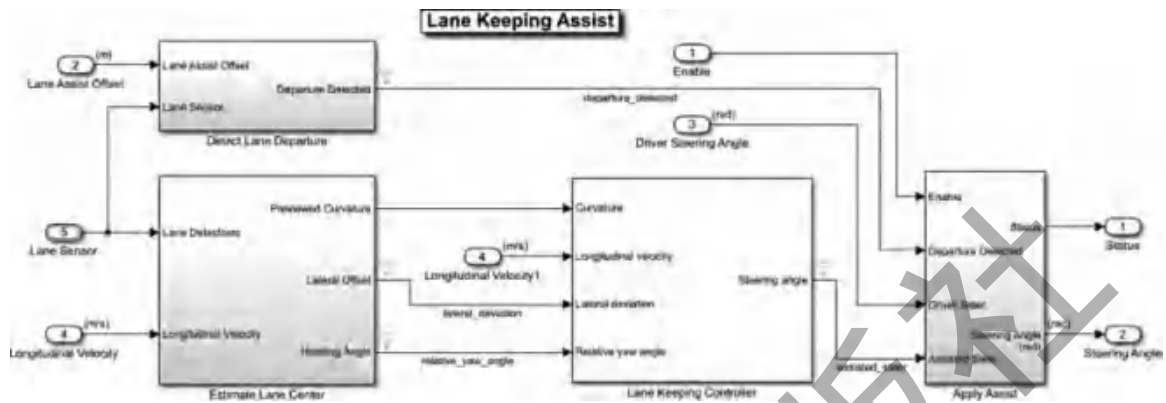


图 1.10 车辆横向控制的仿真模型

### 1.3.2 PreScan

PreScan 是由 Tass International 研发的一款 ADAS 测试仿真软件,2017 年 8 月被西门子收购。PreScan 是一个以物理模型为基础的模拟平台,由基于 GUI 的、用于定义场景的预处理器和用于执行场景的运行环境构成。工程师用于创建和测试算法的主要界面包括 MATLAB 和 Simulink,可以非常方便地实现 ADAS 和无人驾驶系统的仿真模拟。PreScan 可用于从模型在环(MIL)到利用软件在环(SIL)和硬件在环(HIL)系统进行的实时测试等。PreScan 可在开环、闭环以及离线和在线模式下运行。由于它是一种开放型软件平台,其灵活的界面可连接至第三方的汽车动力学模型(例如: Carsim 和 dSPACE ASM)和第三方的 HIL 模拟器/硬件(例如: ETAS、dSPACE 和 Vector),非常方便用户实现定制化开发。图 1.11 为 PreScan 软件仿真示例。



图 1.11 PreScan 软件仿真示例

PreScan 由多个模块组成,使用起来主要分为四个步骤。

- (1) 场景搭建: PreScan 提供一个强大的图形编辑器,用户可以使用道路库,交通标牌、树木和建筑物的基础组件库,机动车、自行车和行人的交通参与者库,修改天气条件(如雨、

雪和雾等)以及光源(如太阳光、大灯和路灯)来构建丰富的仿真场景。新版的 PreScan 也支持导入 OpenDrive 格式的高精地图,来建立更加真实的场景。

(2) 添加传感器: PreScan 支持种类丰富的传感器建模,包括理想传感器、V2X 传感器、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达、单目和双目相机、鱼眼相机等。用户可以根据自己的需求进行添加。

(3) 添加控制系统: 可以通过 MATLAB/Simulink 建立控制模型,也可以和第三方动力学仿真模型(如 Carsim、VI-Grade、dSPACE ASM 的车辆动力学模型)进行闭环控制。

(4) 运行仿真实验: 3D 可视化查看器允许用户分析实验的结果,同时可以提供图片和动画生成功能。此外,使用上位机软件 ControlDesk 和 LabView 的界面可以自动运行实验批次的场景以及运行硬件在环模拟。

智能驾驶系统在 PreScan 中的仿真实现如图 1.12 所示。



图 1.12 PreScan 仿真流程

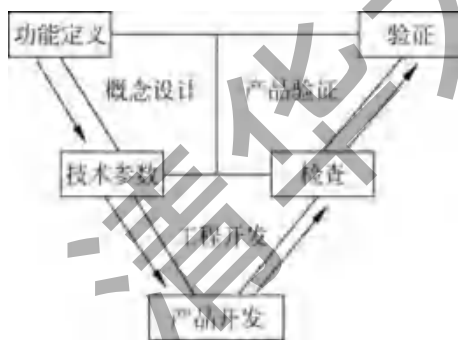


图 1.13 ADAS 产品 V 字形开发流程

PreScan 弥补了现有仿真工具不能可靠地测试整套 ADAS 产品性能的空白,使得 ADAS 产品的开发过程可以满足现代汽车产品 V 字形开发流程,如图 1.13 所示,包括功能定义、技术参数、产品开发、检查和验证五个环节,分为概念设计、工程开发和产品验证三个阶段。

(1) 概念设计阶段可以使用模型在环仿真方法进行开发。

(2) 工程开发阶段,通常情况下控制器逻辑的模拟在包含车辆动力学系统、传感器、执行器和交通场景在内的闭环仿真模型中进行,PreScan 使用经过验证的物理传感器在虚拟的交通场景中模拟各种传感器(如雷达、激光雷达和摄像机等),可以快速、可靠、可重复地分析和研究 ADAS 产品性能,为后续的实验产品检查与验证提供必备的输入和参考。

(3) 产品验证阶段主要对初样进行全面、综合的测试,通过 PreScan 测试后,ADAS 产品将从 PreScan 测试的仿真工况中选择部分工况加载到硬件在环测试系统中,已下载目标代码的 ECU 通过 I/O 接口连接至先前建立的环境模型(硬件在环仿真器),并测试该 ECU

在各种工况下的功能性和稳定性。

基于 PreScan 软件可以非常方便地搭建闭环的硬件在环测试系统,可重复地进行动态仿真;可在试验室里仿真夏季和冬季的道路试验,无需真实的测试环境组件,节约测试成本;可进行临界条件测试和模拟极限工况,如冰雪等低道路附着系数工况,没有实际风险;并可通过软件(仿真模型)、硬件(故障输入模块)模拟各类软硬件故障。在完成关键的硬件在环测试之后,将修正后的控制器连接至真实 I/O 环境,并进行台架试验、道路试验,以验证产品的最终效果。

### 1.3.3 CarSim/TruckSim/CarMaker

CarSim 还有相关的 TruckSim 和 BikeSim 是美国 Mechanical Simulation 公司开发的强大的动力学仿真软件,被世界各国的主机厂和供应商广泛使用。CarSim 针对四轮汽车、轻型卡车,TruckSim 针对多轴和双轮胎的卡车,BikeSim 针对两轮摩托车(图 1.14)。CarSim 是一款整车动力学仿真软件,包括图形化数据库、车辆数学模型及求解器、绘图器、仿真动画显示器等模块。CarSim 主要从整车动力学角度进行仿真,它内建了相当数量的车辆数学模型,并且这些模型都有丰富的经验参数,用户可以快速使用,免去了繁杂的建模和调参过程。CarSim 模型在计算机上运行的速度可以比实时快 10 倍,可以仿真车辆对驾驶员控制、3D 路面及空气动力学输入的响应,模拟结果高度逼近真实车辆,主要用来预测和仿真汽车整车的操纵稳定性、制动性、平顺性、动力性和经济性。CarSim 自带标准的 MATLAB/Simulink 接口,可以方便地与 MATLAB/Simulink 进行联合仿真,用于控制算法的开发,同时在仿真时可以产生大量数据结果用于后续使用 MATLAB 或者 Excel 进行分析或可视化。CarSim 同时提供了 RT 版本,可以支持主流的 HIL 测试系统,如 dSPACE 和 NI 的系统,方便与第三方软件联合进行 HIL 仿真测试。

中型到重型的卡车、客车和挂车动力学特性的仿真和分析,可以利用 TruckSim 软件包来进行,TruckSim 与 CarSim 在操作上非常相近,但也有一些重要区别。与轿车相比,卡车和客车使用不同的转向系统,而且还会有双轮胎,多轴的布置形式,并有多数的拖车-挂车组合形式。TruckSim 有两个大的类别,一种是刚性车体,另一种是车架可扭转,而且带驾驶室悬置。每一个类别里都有 12 种基本的整车布置形式、扭转车架可供选择,如可得到车架的数据,这种结构的模型便可得到更准确的预测结果。如客户需要,可以定制特殊的整车布置形式,在 TruckSim 环境下,所能提供的车型种类几乎涵盖了世界上的大部分卡车和客车类型。



图 1.14 CarSim 软件仿真界面

CarMaker 还有相关的 TruckMaker 和 MotorcycleMaker 是德国 IPG 公司推出的动力学、ADAS 和自动驾驶仿真软件。CarMaker 是一款优秀的动力学仿真软件(图 1.15),提供了精准的车辆本体模型(如发动机、底盘、悬架、传动、转向等),还包含有新能源汽车动力系统模型。除此之外,CarMaker 还打造了包括车辆、驾驶员、复杂道路、交通环境的闭环仿真系统。

IPG Road: 可模拟多车道、十字路口等多种形式的道路,并可通过配置 GUI 生成锥形、



图 1.15 CarMaker 软件仿真界面

圆柱形等形式的路障。可对道路的几何形状以及路面状况(不平度、粗糙度)进行任意定义。

IPG Traffic: 是交通环境模拟工具,提供丰富的交通对象(车辆、行人、路标、交通灯、道路施工建筑等)模型。可实现对真实交通环境的仿真。测试车辆可识别交通对象并由此进行动作触发(如限速标志可触发车辆进行相应的减速动作)。

IPG Driver: 可提供先进的、自学习的驾驶员模型。可控制在各种行驶工况下的车辆,实现诸如上坡起步、入库泊车以及甩尾反打方向盘等操作。并能适应车辆的动力特性(如不同的驱动形式、变速箱类型等)、道路摩擦系数、风速、交通环境状况,调整驾驶策略。

CarMaker 作为平台软件,可以与很多第三方软件进行集成,如 Adams、AVLCruise、rFpro 等,可利用各软件的优势进行联合仿真。同时 CarMaker 配套的硬件,提供了大量的板卡接口,可以方便地与 ECU 或者传感器进行 HIL 测试。

### 1.3.4 PanoSim

PanoSim 是新一代汽车智能驾驶模拟仿真软件,且专注于通过模拟仿真技术实现汽车虚拟研发的一体化工具与平台(图 1.16),提供包括离线仿真(offline simulation)、实时-软硬件在环仿真(RT-SIL/HIL simulation)和驾驶员在环仿真(RT-DIL Simulation)等在内的多平台、全流程解决方案,支持覆盖的应用范围既包含传统汽车性能设计、开发和验证(例如汽车底盘和整车性能开发、汽车动力性能开发、汽车电控系统设计与开发等),又包含新兴汽车智能辅助驾驶与主动安全技术与产品研发(例如环境传感与感知、数据融合、ADAS 研发测试与验证、V2X 与车联网、无人驾驶等)。

PanoSim 集车辆动力学模型、汽车三维行驶环境模型、汽车行驶交通模型、车载环境传感模型、无线通信模型、GPS 和数字地图模型、MATLAB/Simulink 仿真模型自动生成、图形与动画后处理工具等于一体,基于精确与高效兼顾的物理建模和数值仿真原则,利用先进