

2020

中国自动驾驶仿真蓝皮书

B L U E P A P E R



A U T O N O M O U S D R I V I N G S I M U L A T I O N

课题组

课题负责人

张永伟 中国电动汽车百人会副理事长兼秘书长
钟翔平 腾讯副总裁

课题组成员

朱 雷 中国电动汽车百人会智能网联研究院研究总监
张 强 中国电动汽车百人会智能网联研究院研究员
徐名赫 中国电动汽车百人会智能网联研究院研究员
钟学丹 腾讯智慧出行副总裁
苏奎峰 腾讯自动驾驶总经理
孙驰天 腾讯自动驾驶仿真技术总监
朱向雷 中汽数据有限公司副总经理总工程师
周博林 中汽数据有限公司国际标准总监
陈 蓁 中汽数据有限公司标准法规高级经理



摘要

自动驾驶汽车在真正商业化应用前，需要经历大量的道路测试才能达到商用要求。采用路测来优化自动驾驶算法耗费的时间和成本太高，且开放道路测试仍受到法规限制，极端交通条件和场景复现困难，测试安全存在隐患。世界各国交通环境也大相径庭，形成全球通用的产业链体系比较困难。以上种种问题使得自动驾驶产业链的全球化发展和技术交流面临众多实际问题。因此，基于场景库的仿真测试是解决自动驾驶研发测试挑战的主要路线。

自动驾驶仿真测试已经被行业广泛接受。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。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，行业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、经济的状态。

自动驾驶仿真测试平台必须要具备几种核心能力：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，使得仿真测试满足自动驾驶感知、决策规划和控制全栈算法的闭环，符合汽车 V 字开发流程。

基于这几种技术能力的要求，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。在科技公司当中，以腾讯为例，基于在地图、游戏、云计算、人工智能等领域的技术积累，腾讯自动驾驶虚拟仿真平台 TAD Sim 可以实现自动化的场景生成和云端高并发测试，大幅提高自动驾驶测试验证效率，目前已经与长沙、襄阳、深圳等地智能网联测试场展开虚实一体的自动驾驶测试合作，并荣获 2020 全球新能源汽车创新技术大奖。

中国是世界最大的汽车生产与消费国，仿真软件作为自动驾驶汽车研发过程中最核心的关键技术之一，必须实现自主研发，以在国际竞争中占据主导地位。美国和德国仿真软件企业及单位总数占全球总数一半以上。中国企业在此领域处于追赶阶段，为实现本土化的自动驾驶，需不断强化适合中国市场和交通环境的自动驾驶虚拟仿真测试技术，有助于实现中国智能汽车创新发展战略 2025 年目标。

为提升智能网联汽车的测试验证效率，有企业和智能网联示范区开展了路测与虚拟仿真相结合的测试模式。我国也正在鼓励探索自动驾驶汽车与数字智能化道路有机融合的仿真技术。仿真技术在虚拟环境中模拟智能交通运行，为智能交通调度运营管理提供决策依据，助力智慧城市的建设。

目录

第一章 自动驾驶仿真测试的意义	1
1.1 自动驾驶商业化面临路测数据匮乏的挑战	2
1.2 基于场景库的仿真测试成为自动驾驶研发的关键	3
1.2.1 场景的构成	3
1.2.2 场景库的特点	4
1.3 仿真测试与道路测试结合推动自动驾驶研发	4
第二章 国内外自动驾驶仿真测试发展现状	6
2.1 政策法规现状	7
2.2 标准发展现状	8
2.3 仿真测试应用现状	10
2.3.1 科技公司	10
2.3.2 整车企业	14
2.3.3 自动驾驶解决方案商	14
2.3.4 仿真软件企业	15
2.3.5 高校及科研机构	17
2.3.6 智能网联测试示范区	18
第三章 自动驾驶仿真测试平台环境	20
3.1 仿真测试平台功能需求	21
3.1.1 满足自动驾驶感知、决策规划、控制全栈算法的闭环仿真测试	21
3.1.2 满足汽车 V 字开发流程	21
3.1.3 加速自动驾驶算法迭代升级	21
3.2 仿真测试平台技术架构与能力	22
3.2.1 虚拟场景构建	22
3.2.2 感知系统仿真	23
3.2.3 车辆动力学仿真	24
3.2.4 云加速仿真	24
3.3 仿真测试平台核心功能	25
3.3.1 超高还原度的仿真场景	25

3.3.2 利用路采数据生成交互性强和还原度高的交通场景	25
3.3.3 云端大规模并行加速，提升仿真测试效率	25
第四章 场景库体系建立与开放	27
4.1 自动驾驶测试场景库体系的搭建	28
4.1.1 场景库的概念	28
4.1.2 场景数据来源	29
4.1.3 场景的自动化生成	30
4.1.4 场景数据格式标准	30
4.1.5 场景库的搭建流程	31
4.2 道路测试到场景转化	32
4.3 国内典型场景库	32
4.3.1 中汽数据有限公司场景案例库	32
4.3.2 中国汽车工程研究院股份有限公司中国典型场景库 V2.0	34
4.3.3 腾讯 TAD Sim 场景库	35
4.3.4 百度 Apollo 场景库	36
4.4 共建自动驾驶场景库	37
第五章 自动驾驶测试评价体系	38
5.1 自动驾驶测试评价方法	39
5.2 仿真测试的真实性与有效性评价	41
5.2.1 真实性评价	41
5.2.2 有效性评价	41
5.3 仿真测试与道路测试的闭环验证	45
第六章 中国自动驾驶仿真测试展望	46
6.1 自动驾驶仿真测试面临挑战	47
6.1.1 仿真场景库建设与合作机制有待完善	47
6.1.2 自动驾驶仿真测试评价体系缺乏规范	47
6.2 自动驾驶仿真测试发展建议	47



第一章

自动驾驶仿真测试的意义

『 1.1 自动驾驶商业化面临路测数据匮乏的挑战 』

自动驾驶汽车在真正商业化应用前，需要经历大量的道路测试才能达到商用要求。但作为新兴事物，自动驾驶汽车仍面临着大量问题需要克服，如道路测试的时间成本、各国对于自动驾驶的法律法规容忍度、极端场景及危险工况的测试安全性、各国道路交通环境及习惯不同等问题，都给自动驾驶系统研发测试带来诸多困难。

采用路测来优化自动驾驶算法耗费的时间与成本太高。自动驾驶属于人工智能范畴，仍处于不断发展阶段。根据美国兰德公司的研究，自动驾驶算法想要达到人类驾驶员水平至少需要累计 177 亿公里的驾驶数据来完善算法。如果配置一支 100 辆自动驾驶测试车的车队，每天 24 小时不停歇路测，平均时速 25 英里（40 公里）每小时来计算，需要 500 多年的时间才能完成目标里程，期间所耗费的时间和成本是难以承受的。

自动驾驶相应交通法规及保险理赔机制的缺失制约了自动驾驶汽车路测的大范围开展。由于自动驾驶汽车尚不能保证绝对安全，我国政府对开放自动驾驶道路测试保持谨慎的态度，仅依靠部分开放道路以及智能网联测试区进行路测，难以满足自动驾驶汽车旺盛的测试需求。主要体现在以下四个方面：

◆自动驾驶汽车路测缺乏法律依据。目前在绝大部分公开道路，尤其是高速公路上测试自动驾驶汽车仍然缺乏法律依据，阻碍了测试的进度。

◆自动驾驶路测车辆禁止载人载货，导致测试不全面。现行规定明确禁止测试过程中搭乘与测试无关的人员或货物，阻碍了测试主体开展更丰富的自动驾驶技术性测试。

◆自动驾驶交通事故责任划分缺乏法律依据。由于自动驾驶汽车的驾驶主体是自动驾驶系统或自动驾驶服务商，和现行人类驾驶员为主体的交通法规体系存在很大差别。《侵权责任法》、《道路交通安全法》等法规中有关机动车交通事故的责任体系将不再适合，导致目前自动驾驶汽车的相关法律纠纷出现无法可依的局面。

◆自动驾驶汽车缺乏相应的保险理赔机制。自动驾驶汽车突破了有关机动车保险的规定，使得目前的自动驾驶汽车“无险可投”，增加了测试企业及其他交通参与者的风险。

极端交通条件和危险场景复现困难，而且测试安全存在隐患。自动驾驶汽车在实际道路行驶过程中，极端交通条件和危险场景可遇不可求，且安全问题也是一大困扰。根据美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）的统计数据，汽车平均行驶 43.6 万英里（70 万公里）才会发生一起事故，平均行驶 1 亿英里（1.6 亿公里）死亡大约 1 人。此外，自动驾驶汽车测试行业依然没有就测试的安全性等标准达成一致，制约了自动驾驶的研发测试。

形成全球认可的自动驾驶产业链体系比较困难。由于世界各国社会和经济环境千差万别，各地区的道路环境和交通习惯也大相径庭。中国的城市道路中快递、外卖、行人混行情况普遍存在，对于自动驾驶汽车的感知决策能力提出了更高的要求。而且中国的道路交通标志、标线设置不规范情况普遍存在，不同地区之间也有差别。国内与国外的交通标志标线颜色、文字说明等方面也存在差别，这些在短期内很难得到改变。上述种种问题使得自动驾驶产业链的全球化发展和技术交流面临众多实际问题。

图表 1 自动驾驶研发与准入测试面临的挑战



资料来源：公开资料，课题组整理

『 1.2 基于场景库的仿真测试成为自动驾驶研发的关键 』

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。

1.2.1 场景的构成

根据中国汽车技术研究中心的分类，自动驾驶测试场景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。

自然驾驶场景来源于汽车真实的自然驾驶状态，是构建自动驾驶测试场景中最基础的数据来源。由于自然驾驶场景包含自动驾驶汽车所处的人 - 车 - 环境 - 任务等全方位信息，如车辆数据、驾驶人行为、道路环境等多维度信息，能够很好地体现测试的随机性、复杂性、典型性区域特点，属于自动驾驶汽车充分测试的场景，目的是为了满足不同自动驾驶汽车最基本的功能开发与验证。

危险工况场景主要包含大量恶劣天气环境、复杂道路交通以及典型交通事故等场景。危险工况场景是自动驾驶汽车测试过程中进行自动驾驶控制策略验证的关键部分，验证自动驾驶车辆在危险工况场景下的避撞能力是整个自动驾驶安全测试的核心，是测试验证自动驾驶有效性的必要测试场景，目的是为了验证自动驾驶汽车的安全性和可靠性。

标准法规场景是验证自动驾驶有效性的一种基础测试场景，目前有 ISO、NHTSA、ENCAP、CNCAP 等多项标准、评价规程对现有自动驾驶功能进行了测试规定。标准法规场景是通过现有的标准、评价规程构建测试场景，目的是对自动驾驶汽车应该具备的基本能力进行测试。

参数重组场景是将已有仿真场景进行参数化设置并完成仿真场景的随机生成或自动重组，具有无限性、扩展性、批量化、自动化等特点。参数重组场景目的是补充自然驾驶场景、标准法规场景、危险工况场景等未覆盖的未知场景，有效覆盖自动驾驶功能测试盲区。

图表 2 不同场景的测试重要性



资料来源：公开资料，课题组整理

1.2.2 场景库的特点

自动驾驶汽车的研发包括开发验证、测试评价、检测认证。每个阶段由于目的不同，其仿真测试对场景库的要求也不同。

(1) 在开发验证阶段，场景库是为了验证自动驾驶汽车各项功能，实现功能的调整和快速迭代，要求场景库具备以下特点：

- ◆场景库应尽可能覆盖所有功能测试，验证各项功能在各种场景下的安全性，对于某些不必要的功能可以剔除；
- ◆测试场景可在现实世界中实施，以验证功能的安全性，场景中的各项要素可根据测试要求进行灵活调整；
- ◆场景可部署到模型在环（MIL）、软件在环（SIL）、硬件在环（HIL）、车辆在环（VIL）等进行完整在环测试。

(2) 在测试评价阶段，场景库是为了评价自动驾驶汽车不同维度、不同方面性能，要求场景库具备以下特点：

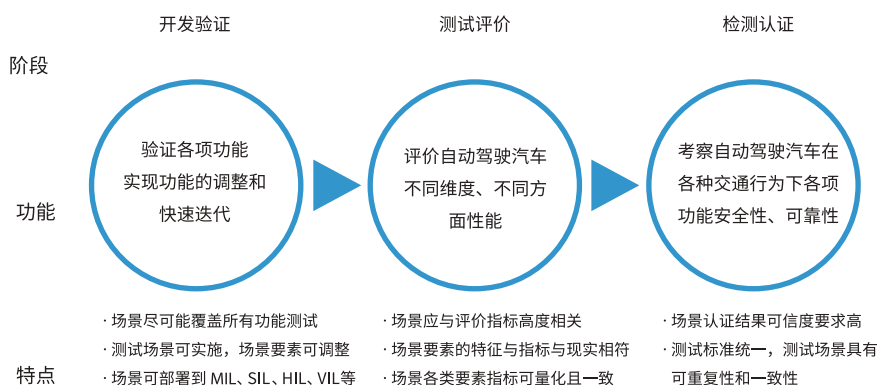
- ◆为了针对性地评价自动驾驶汽车的各项性能，测试场景应与评价指标高度相关；
- ◆为使自动驾驶汽车在真实世界时和测试评价结果一致，要求测试场景要素的特征与指标与现实相符；
- ◆为了准确评价自动驾驶汽车在未知场景的表现，需要对参数重组情况下的场景进行补充测试，要求场景各类要素指标可量化方便进行人工编辑，不同场景下的场景要素指标要一致，方便实现场景数据的存储。

(3) 在检测认证阶段，场景库是为了考察自动驾驶汽车在各种交通行为下各项功能安全性、可靠性，为最终上路做准备，要求场景库具备以下特点：

- ◆自动驾驶上路前需要在各种场景下具备很高的安全性、可靠性，因此对检测认证结果的可信度要达到非常高的水平；
- ◆为了全国推广自动驾驶汽车测试标准，应做到测试标准统一，测试场景具有可重复性和一致性。

场景库的搭建应依据自动驾驶汽车的开发阶段进行针对性或模块化开发，在保证测试要求的前提下尽量降低用户成本。

图表 3 自动驾驶汽车研发的不同阶段对场景的要求



资料来源：公开资料，课题组整理

『 1.3 仿真测试与道路测试结合推动自动驾驶研发 』

在自动驾驶的开发流程中，纯模型仿真—软件在环仿真—半实物仿真—封闭场地道路测试—开放道路测试的开发流程是最经济、高效的开发流程。

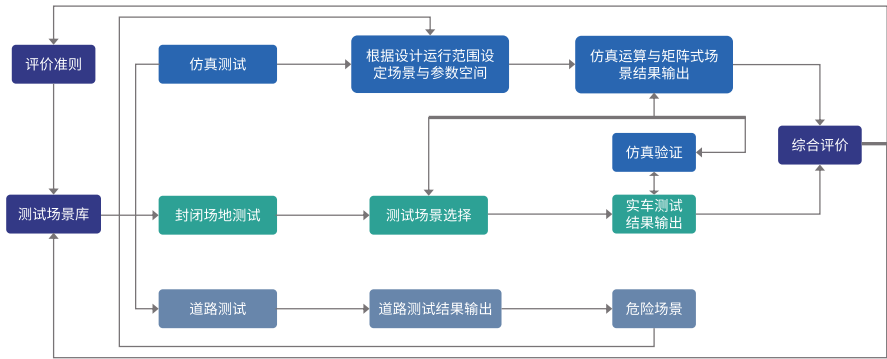
目前自动驾驶仿真已经被行业广泛接受。例如美国自动驾驶领军企业 Waymo 旗下的仿真平台 Carcraft 每天在虚拟道路上行驶约 2000 万英里，相当于在真实世界中行驶 10 年。截止 2020 年 5 月，Waymo 已经模拟行驶了

150 亿英里，相比之下，去年 6 月的数据是 100 亿英里。除 Waymo 外，通用旗下的 Cruise、AutoX、小马智行等国内外自动驾驶解决方案商也在进行大量的仿真测试，以完善自己的自动驾驶系统，仿真测试已经成为自动驾驶商用最重要的测试。

在仿真场景中，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（corner cases）。由于极端场景在现实中可遇不可求，利用仿真平台可以便捷生成，所以业界共识是加大仿真测试在自动驾驶测试中的占比。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。仿真测试结果可以在封闭场地进行测试认证，此外在道路测试基础上总结出危险场景，反馈到仿真测试与封闭场地测试中，最终形成评价结果，逐步完善评价准则和测试场景库，实现了仿真测试、封闭场地测试、道路测试的测试闭环，推动技术迭代升级。

随着仿真技术水平的提高和应用的普及，行业旨在达到通过仿真平台完成 99.9% 的测试量，封闭场地测试完成 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、经济的状态。

图表 4 仿真测试、封闭场地测试、道路测试形成闭环促进研发及标准建立



资料来源：i-VISTA，课题组整理



第二章

国内外自动驾驶仿真测试发展现状

『 2.1 政策法规现状 』

在世界范围内，众多国家针对自动驾驶及相关功能有着不同的政策策略及法规专注度。欧盟认为以协作、网联、自动为特征的出行模式是未来的交通系统发展趋势，但在智能网联汽车整体策略上态度相对保守。美国发展智能网联汽车拥有雄厚的产业优势，参与自动驾驶研发的企业涵盖芯片技术、算法开发、系统集成、电信运营、仿真测试、电子设备、整车制造及信息服务等领域，且全部为本土及国际高精尖企业及研究机构。日本方面，政府非常重视智能网联汽车的研发与应用，并认为加快L3、L4级别自动驾驶汽车的研发需要国家级场景库协助日本主导国际话语权。

各国与地区在仿真测试技术路线上都形成了跨领域、跨行业的合作共赢模式。欧盟大力推进各成员国、各企业机构之间的协调统一、成果共享；美国与日本企业组建跨国、跨行业联盟，发挥各自优势并分担研发成本。我国智能网联仿真测试产业发展迅速，技术创新活跃，产业规模不断扩大，但也存在顶层设计欠缺、部分关键技术缺失、标准法规滞后等问题。我国拥有全球最大汽车市场，强大的信息通信产业以及完备的计算机科学人才等良好基础，积极扩充合作和行业联盟有助于跟上国际合作潮流。

随着自动驾驶技术的发展，具备自动驾驶功能的汽车已经逐渐成为研发热点，世界各国均针对自动驾驶制定了相应战略方针，系统安全性是当前国际法规研究的重点。在联合国层面，世界车辆法规协调论坛 WP.29 成立了自动驾驶汽车工作组（GRVA），该工作组正在进行自动驾驶相关安全法规的制定。在 GRVA 子工作组 VMAD 自动驾驶安全验证方法中，形成了以道路测试、场地测试、仿真测试、审核与验证、交通场景等为支撑的“多支柱验证方法”，仿真及虚拟测试逐渐成为被国际认可的自动驾驶功能验证中必不可少的一环。2020 年中国作为联合主席成员国，参与起草 GRVA 子工作组 FRAV《自动驾驶车辆的通用功能性要求》草案，此草案从系统安全、设计运行域、故障保护响应、目标事件检测和响应、人机交互界面及操作员信息等方面提出了对自动驾驶功能安全的要求。

2020 年 6 月，WP.29 世界车辆法规协调论坛通过了世界上首个针对 Level 3 级自动驾驶车辆有约束力的法规——UN Regulation on Automated Lane Keeping Systems(ALKS)，此条款从 2021 年 1 月正式开始生效。此条款规定了自动驾驶车辆开启自动车道保持功能的具体需求、移交条件及干预条件，其中重点约束了车载显示器、人机交互条件、与驾驶员车辆控制权移交、驾驶员没有做出正确判断后的系统退出机制等。牵头此草案的国家为日本和德国，通过此条款后，日本、法国、荷兰以及加拿大等国已经确立了此草案与当地法规的生效关系，英国同样承诺在预设的 300 英里公开测试道路上及相关区域进行相应测试。

此外，此法规同时着重描述了此自动驾驶功能与多支柱法之间的关系，提出了具体的道路测试、场地测试、仿真测试、审核与验证具体的映射关系，进一步确立了多支柱法中不同条件的交互关系。此外针对安全及相应问题，提出了以下几点要求：

- ◆发生碰撞情况下的紧急情况的处理机制，需要利用仿真进行相应测试；
- ◆系统失效条件下，要求驾驶员取回控制权及相应条件；
- ◆提出系统移交条件以及驾驶员无回应时的系统保护的风险条件；
- ◆安装车辆驾驶员就位识别系统，识别驾驶员就位及其控制意图识别；
- ◆车辆车载自动驾驶信息存储系统，以及其相应信息记录机制；
- ◆车辆出售前车辆性能及表现需求声明，提出配备此功能车辆的表现需求及后续保养需求等。

此法规的发布，对国内自动驾驶标准法规的制定同样具有借鉴意义。

『 2.2 标准发展现状 』

国际标准化组织 ISO 于 2018 年正式成立 TC22/SC33 WG9 自动驾驶场景工作组，制定自动驾驶测试场景相关标准。此工作组由中国牵头，汽车标准委员会秘书处王兆作为召集人，这是我国在 ISO/TC22（道路车辆委员会）范畴内首次承担国际标准工作组（WG）召集人职责，是我国在汽车国际化方面迈出的重要一步。WG9 工作组下一步工作重点是形成现阶段工作情况报告，尽快制定完成和发布该系列标准，为国际相关标准法规及产业应用提供支持。

自动驾驶场景工作组已于 2019 年通过了四项标准以及一项预留标准的立案，具体标准见下表，其中，34505“基于场景的自动驾驶系统的评测体系”为预留草案。

图表 5 ISO TC22/SC33 WG9 自动驾驶场景工作组研究内容

编号	内容	牵头
ISO 34501	自动驾驶系统测试场景术语与通用信息	中国
ISO 34502	基于自动驾驶车辆安全认证为目的的场景工程框架设定	日本 德国
ISO 34503	自动驾驶系统的设计运行域分类	英国 日本
ISO 34504	场景特征及场景分类定义	德国 荷兰
ISO 34505	基于场景的自动驾驶系统的评测体系	中国 英国

资料来源：中汽数据有限公司，课题组整理

中国国内在仿真测试行业中，逐步认识到相关重要性，2020 年，由中国汽车技术研究中心有限公司撰写的《自动驾驶测试场景技术发展与应用》出版上市，此书籍由全国汽车标准技术委员会 (SAC/TC 114) 及其智能网联汽车分技术委员会 (SC 34) 秘书处统筹组织规划，同济大学、华为技术有限公司、吉林大学、上汽集团前瞻技术研究部、中国第一汽车集团、中国汽车技术研究中心有限公司、国汽智联、阿里巴巴菜鸟网络等单位作为各章节主要编写单位，共计来自于 30 余家骨干单位近百名专家参与撰写。

此书作为 2019 年至今为止在仿真测试方面，涵盖最多的成员单位，最为集中的体系与内容，逐步将会成为仿真测试行业中标准的先行团队。后期相应研究标准将按照《自动驾驶测试场景技术发展与应用》逐步形成标准化内容。针对此方向标准，全国汽车标准技术委员会 (SAC/TC 114) 已于 2019 年在全国范围内成立《自动驾驶汽车仿真测试标准化需求研究》项目组，由中国汽车技术研究中心有限公司牵头组建。此项标准将在仿真测试通用要求、测试工具、测试流程等方面开展标准化研究工作，并组织项目组成员进行仿真测试与实车测试对比试验，用以验证仿真测试的真实性、可重复性等。后续该项目组将按照规划按时完成研究报告，并同步开展相关标准预研工作。

除 ISO 外，其他国家与组织也针对自动驾驶测试场景展开了研究。2016 年，德国联邦经济与能源部 (BMWi) 启动 PEGASUS 项目，旨在开发一套自动驾驶功能测试程序，以促进自动驾驶技术的快速落地。PEGASUS 项目内容包括定义自动驾驶车辆在仿真、测试场地以及实际环境中的测试与实验标准流程；开发一个持续的和灵活的工具链以维护自动驾驶开发与验证；在开发早期的阶段集成测试；创建跨整车厂的方法来维护高度自动驾驶功能等。

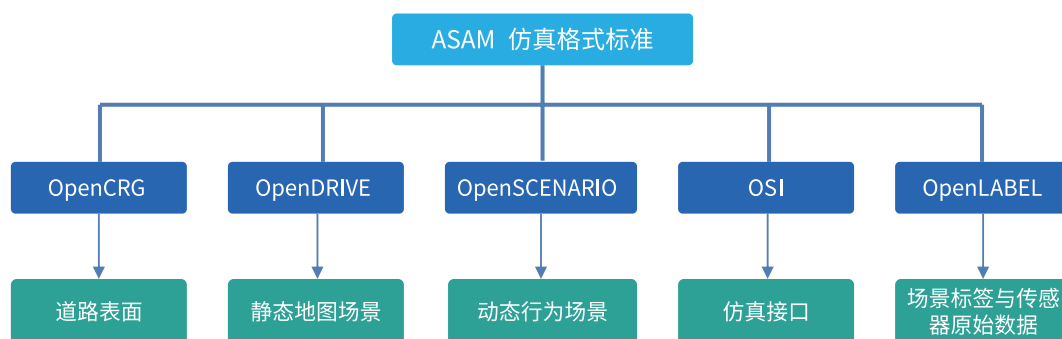
PEGASUS 项目于 2019 年 5 月结项，其中一项重要研究成果就是 OpenCRG、OpenDRIVE、OpenSCENARIO 三项驾驶场景仿真格式标准。该标准已于 2018 年正式从戴姆勒和 VIREN 转交 ASAM 进行下一步标准维护与开发。以此为契机，ASAM 于 2018 年新开创一类标准——仿真，用于制定和协调自动驾驶领域的相关仿真标准。

德国自动化及测量系统标准协会 (ASAM) 是一家非政府的汽车领域标准化制定机构，1998 年由数位行业专家

为标准化 ECU 开发与测试中的数据交互而创立，致力于实现开发流程中各环节的数据信息自由交换。截至 2019 年，共有来自亚洲、欧洲、北美洲的 295 家整车厂、供应商及科研机构加入成为会员。ASAM 推出的标准涉及多个汽车标准领域，包括仿真、车联网、测量与校准、诊断、自动化测试、软件开发、ECU 网络和数据管理与分析等。

随着自动驾驶技术的发展，仿真测试对于自动驾驶的安全落地至关重要，ASAM 发布的 OpenX 标准得到了全球广泛关注，热度逐渐提升。成员单位提出希望制定更多的仿真领域标准，并以 OpenX 命名，其中还包括 Open LABEL。2019 年 10 月，由宝马开发的 OSI 标准正式移交 ASAM 进行维护与开发。至此，ASAM 启动的 OpenX 包含标准达到了 5 项（见图表 6）。同时随着全球自动驾驶测试需求的提升，更多的标准提案与计划已经提上日程。2020 年是自动驾驶应用落地的重要开端，也是 OpenX 标准体系应用推广的重要一年。

图表 6 ASAM OpenX 自动驾驶仿真测试标准体系

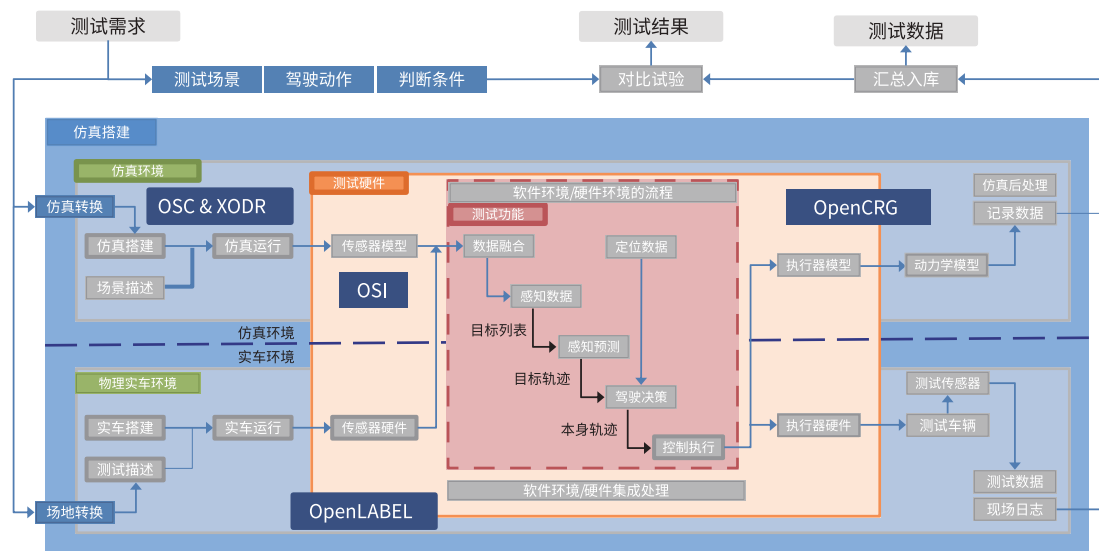


资料来源：中汽数据有限公司，课题组整理

目前，在 ASAM 仿真验证领域，OpenX 系列标准主要包括 OpenDRIVE、OpenSCENARIO、Open Simulation Interface（OSI）、OpenLABEL 和 OpenCRG 五大板块。在仿真测试的整体流程中，OpenDRIVE 和 OpenSCENARIO 针对仿真场景的不同数据格式进行统一；OpenLABEL 将对于原始数据和场景给出统一的标定方法；OSI 连接了自动驾驶功能与仿真工具，同时集成了多种传感器；OpenCRG 则实现了路面物理信息与静态道路场景的交互。

中国的驾驶场景极具特色，不仅道路结构、交通标志、交通信号灯等形态各异，人车混流的交通状况也为构建动态仿真场景增加了许多难度。为了更有针对性地解决与中国特色场景相关的诸多问题，ASAM 标准协会于 2018 年与中汽中心下属中汽数据有限公司（以下简称“中汽数据”）开展技术交流。中汽数据在驾驶场景、模拟仿真等领域取得的进展得到了 ASAM 的高度认可。2019 年 9 月，中汽数据与 ASAM 联合发表声明，共同组建 C-ASAM 工作组。针对 ASAM OpenX 模拟仿真测试场景标准，C-ASAM 工作组将整合中国智能网联汽车行业，利用国际合作平台价值，实现互通互利，携手共进，达成共赢的局面。针对以上研究内容，从以下几大方面进行拓展（见图表 7）。

图表 7 C-ASAM 工作组研究框架及内容拓展



资料来源：中汽数据有限公司，课题组整理

目前 C-ASAM 工作组成员包括上汽集团、腾讯、华为、百度、赛目、四维图新、北京航空航天大学等 20 余家中国企业与研究机构，共同为中国在相应标准中发声，成为中国对标国际标准内容的重要工作组。基于数据接口和格式等仿真验证领域的共性问题，ASAM 引入的 OpenX 系列标准填补了行业多项空白。该系列标准的推出与完善，使得仿真测试场景中各要素之间的隔阂逐渐被打破，原本孤立的各环节的贯通与交互成为可能。而随着我国汽车仿真验证领域的国际化接轨进程将加快，OpenX 系列标准的影响也将不断扩展。

『 2.3 仿真测试应用现状 』

目前自动驾驶仿真市场参与主体主要包括：科技公司、车企、自动驾驶解决方案商、仿真软件企业、高校及科研机构、智能网联测试示范区。由于每个市场主体在自动驾驶仿真方面的技术基础不同，因此在推动自动驾驶仿真方面的研发及合作方式呈现不同模式。

2.3.1 科技公司

科技公司在仿真方面起步相对较晚，在汽车功能探索方面经验较少，但是具备大数据优势，软件开发能力强。自动驾驶汽车相比传统汽车，对软件的需求更大，科技公司进行仿真软件的探索，目的是进入市场庞大的汽车行业，建立更大的数据平台，形成新的业务增长点。目前自动驾驶仿真科技公司主要包括腾讯、百度、华为、阿里等。

1. 腾讯自动驾驶仿真平台 TAD Sim

腾讯自动驾驶仿真平台 TAD Sim (Tencent Autonomous Driving Simulator) 于 2018 年发布，是结合了专业的游戏引擎、工业级车辆动力学模型、虚实一体交通流等技术打造的虚实结合、线上线下一体的自动驾驶仿真平台。

游戏技术对自动驾驶仿真有很大的助力作用。为实现场景的高还原度，腾讯发挥自身在游戏领域的经验和技能，应用了包括场景还原、大气系统、传感器仿真、物理引擎、Agent AI、云游戏技术、MMO 同步等游戏技术。游戏技术的应用可实现场景的几何还原、逻辑还原及物理还原。在场景几何还原上，TAD Sim 可实现三维场景仿真和传感器仿真，使环境和测试车辆条件都与现实世界相同；在场景逻辑还原上，TAD Sim 可在虚拟世界中模拟出测试车辆

的决策规划过程；在场景物理还原上，TAD Sim 可模拟出车辆的操控和车身动力学作用结果，使虚拟世界的自动驾驶测试结果与现实世界无限接近。

TAD Sim 内置高精度地图，可以完成感知、决策、控制算法等实车上全部模块的闭环仿真验证。不同天气、光照条件等环境的场景模拟，以及测试车辆的感知能力、决策能力和车辆控制仿真均可以实现。

图表 8 腾讯 TAD Sim 部分场景展示



资料来源：腾讯，课题组整理

TAD Sim 支持云端运行，包括场景型云仿真和虚拟城市型云仿真两种模式。城市型云仿真既可以实现加速仿真，也可以实现高并发仿真，满足真实世界中各种场景和驾驶的可能性，加速企业自动驾驶测试进程。

通过完整的模型在环、软件在环、硬件在环、车辆在环的测试验证体系，TAD Sim2.0 覆盖了完整的汽车 V 字开发流程，并融入了自动驾驶研发体系。

腾讯 TAD Sim 不仅可供车企及自动驾驶技术开发者进行研发测试，还可以为政策制定部门、交通管理部门提供交通调度管理、道路及交通规划、自动驾驶法规研究等方面的测试平台。

2020 年 6 月 TAD Sim 2.0 版本发布，在原有基础上进行了架构的优化升级，数据传输能力和加速能力都有大幅提升，资源占用量减少 30%。目前场景库中有超过 1000 种场景类型，可以泛化生成万倍以上丰富场景，具备每日 1000 万公里以上的测试能力。

目前，TAD Sim 正在与国家智能网联汽车测试区、国家部委，以及国内头部车企展开合作，基于高精度地图和虚拟仿真技术，推行虚实结合的仿真测试，加速自动驾驶研发落地。

图表 9 腾讯自动驾驶业务体系



资料来源：公开资料，课题组整理

2. 百度增强现实的自动驾驶仿真系统 AADS

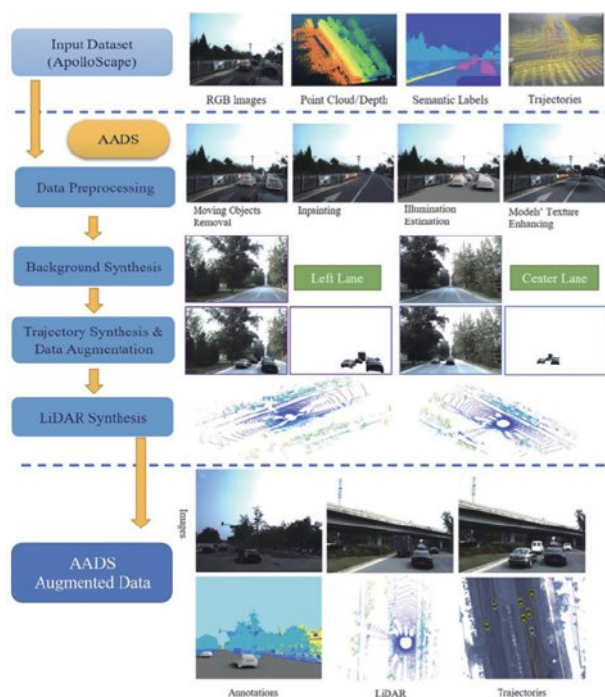
百度自主研发的增强现实的自动驾驶仿真系统 (AADS: Augmented autonomous driving simulation using data-driven algorithms) 由百度研究院机器人与自动驾驶实验室开发, 它不仅能大大降低仿真系统的测试成本, 还在真实性和扩展性方面实现了质的飞跃。

AADS 系统包含一套全新开发的基于数据驱动的交通流仿真框架和一套全新的基于图像渲染的场景图片合成框架。在获得真实感的车流移动和场景图像之后, 系统利用增强现实技术可直接、全自动地创建逼真的仿真图像, 消除了现有仿真系统中游戏引擎渲染图片与真实图片之间的差距。

在 AADS 系统中, 使用一台安装了激光雷达和双目相机的汽车扫描街道, 便可获得自动驾驶仿真的全部素材。AADS 可自动将输入素材分解为背景、场景照明和前景对象。通过 AADS 中全新开发的视图合成技术, 可以在静态背景上改变视点, 生成任意视角的真实图片。比如, 扫描街景图片后, AADS 系统可以变换街景图片的视角, 进而模仿车在不同环境里面行走的动作。

基于 AADS 系统, 百度还同时发布了两大公开数据集, 即 ApolloCar3D 和 TrafficPredict。这两个数据集是百度 ApolloScape 开源项目的一部分, 其中 ApolloCar3D 数据集包括超过六万车辆的实例, 配有高质量的三维 CAD 模型和语义关键点。TrafficPredict 是一个运动物体的轨迹数据集, 包括时间戳、车辆 ID、类别、位置、速度、朝向等信息, 轨迹总长度达到 1000 多公里。

图表 10 百度增强现实的自动驾驶仿真系统 AADS



资料来源: 公开资料, 课题组整理

3. 华为自动驾驶云服务 Octopus

2019 年 4 月上海车展上, 华为首次展出自动驾驶云服务 Octopus。2019 年 12 月 13 日, 湘江新区完成华为自动驾驶云服务的采购, 启动湖南智能网联汽车产业云的布置和实施。2020 年 1 月 9 日, 湖南智能网联汽车产业云正式上线。迄今为止, 已经有 3 家企业上线湖南智能网联汽车产业云, 并使用华为自动驾驶云仿真训练服务。

华为的自动驾驶云服务 Octopus 形为八爪鱼, 服务覆盖自动驾驶数据、模型、训练、仿真、标注等全生命周期业务, 向开发者提供包括数据服务、训练服务、仿真服务在内的三大服务。基于三大服务, 华为的自动驾驶云服务“八

“八爪鱼”能为企业用户提供以下核心能力：

- ◆处理海量数据，自动化挖掘及标注，能够节省 70% 以上的人力成本；
- ◆软硬件加速，平台提供华为自研昇腾 910 AI 芯片和 MindSpore AI 框架能大幅提升训练及仿真效率；
- ◆丰富的仿真场景，高并发实例处理能力：通过集成场景设计和数据驱动的方法，合计提供超过 1 万个仿真场景；系统每日虚拟测试里程可超过 500 万公里，支持 3000 个实例并发测试；
- ◆云管端芯协同，车云无缝对接：Octopus 天然支持无缝对接 MDC（移动数据中心）等车端硬件平台和 ADAS 系统，实现车云协同。

华为自动驾驶云服务 Octopus 与华为 MDC、智能驾驶 OS 联合，共同组成车云协同的智能驾驶平台，未来华为会将高精地图、5G 及 V2X 技术等能力集成到“八爪鱼”中，帮助车企和开发者开发自动驾驶应用。

在仿真训练服务方面，华为自动驾驶云服务平台内置超过 1 万个仿真场景，覆盖智能驾驶、主动安全、危险场景等六大场景，并且支持将路测数据场景转换为仿真场景，每日虚拟测试里程可超过 500 万公里。

4. 阿里混合式仿真测试平台

2020 年 4 月 22 日，阿里达摩院对外发布全球首个自动驾驶“混合式仿真测试平台”，该平台采用虚拟与现实结合的仿真技术，引进真实路测场景和云端训练师。该平台可以任意增加极端路测场景变量，在实际路测中，复现一次极端场景的接管可能需要 1 个月的时间，阿里混合式仿真测试平台可在 30 秒内模拟一次极端场景。每日虚拟测试里程可超过 800 万公里，提升自动驾驶 AI 模型训练效率。

阿里混合式仿真测试平台不仅可以真实路测数据自动生成仿真场景，还可通过人为随机干预，实时模拟前后车辆加速、急转弯、紧急停车等场景，加大自动驾驶车辆的避障训练难度。

图表 11 科技公司自动驾驶仿真平台对比

公司名称	腾讯	百度	华为	阿里
技术特点	<ul style="list-style-type: none"> > 游戏技术 · 数据驱动 · 天气系统 · 传感器仿真 · 物理引擎 · Agent AI · 云游戏技术 · MMO 同步技术 > 高精度地图 > 云平台 > 日测 1000 万公里 	<ul style="list-style-type: none"> > 数据技术 · AADS（增强现实的自动驾驶仿真系统） · ApolloCar3D · TrafficPredict > 百度云 	<ul style="list-style-type: none"> > 全生命周期服务 · 覆盖自动驾驶数据、模型、训练、仿真、标注等 > 软硬件平台 · 自研 AI 芯片 · 自研 AI 框架 > 车云协同数据对接 	<ul style="list-style-type: none"> > 虚拟与现实结合仿真技术 · 极端场景模拟只需 30 秒 · 每日虚拟测试里程可达 800 万公里 > 阿里云技术

资料来源：公开资料，课题组整理

5. 其他

此外，微软、英伟达及 LG 等国外科技公司主要针对自动驾驶仿真软件进行研发，通过和产业链企业合作建立了自动驾驶研发生态体系，成为自动驾驶仿真的重要参与者。

英伟达于 2018 年 3 月推出基于云的 NVIDIA Drive Constellation 仿真系统，并于 2019 年 3 月正式上市。该仿真系统由两台不同的服务器而打造，第一台服务器运行英伟达 DRIVE Sim 软件来仿真自动驾驶汽车的传感器，如相机、激光雷达和雷达。第二台服务器搭载了英伟达 DRIVE Pegasus 人工智能车载计算平台，用来处理仿真的传感器

数据。在场景方面, Drive Constellation 可以生成逼真的数据流, 创建各种测试环境, 模拟暴雨和暴雪等各种天气条件, 以及不同的路面和地形。还可以模拟白天不同时间的眩目强光以及晚上有限的视野。目前, 英伟达已经和奔驰、奥迪、丰田、沃尔沃、博世、大陆等公司建立了自动驾驶研发合作。

微软于 2017 年开源了跨平台虚幻引擎模拟器 AirSim, 支持无人机以及自动驾驶模拟仿真, 同时可以创建高逼真的交通环境, 实现车辆及传感器仿真模拟。

LG 硅谷实验室于 2019 年初发布了开源的自动驾驶模拟器 LGSVL Simulator, 其支持传感器仿真及可编辑地图、车辆、天气、交通流、行人等, 并且可连接百度阿波罗平台及 Autoware Foundation (国际自动驾驶开源联盟) 进行仿真模拟。

2.3.2 整车企业

路测和仿真测试同步进行是整车企业的最佳选择, 而自动驾驶汽车在真正实现落地之前, 需经过众多功能与安全测试, 路测就是其中一环。由于路测效率较低, 目前很多车企都倾向于选择自动驾驶仿真测试与路测相结合的方式来完成落地前的测试工作。

当前全球各大车企正在用仿真测试里程来取代一部分实际路测里程, 即自动驾驶测试 90% 通过模拟仿真平台完成, 9% 通过测试场完成, 1% 通过实际道路测试完成。模拟仿真测试已经成为加速自动驾驶技术研发和测试落地的重要手段。考虑到车企自身软件开发能力弱, 无法独立完成仿真测试, 一般通过和科技公司或者自动驾驶仿真软件企业合作, 利用后者仿真软件进行自动驾驶汽车开发, 如上汽与 TAD Sim, 江淮与 Prescan (见图表 12)。

图表 12 车企利用自动驾驶仿真软件情况

车企	自动驾驶仿真软件
一汽	Panosim、Adams、TESIS
上汽	TAD Sim、Mentor、Matlab
长安	Prescan、Carmaker
江淮	Prescan
蔚来	Carmaker
戴姆勒	Simpack (商用车仿真软件)
宝马	Carmaker、VI-grade
大众	Carsim、Carmaker
奥迪	VTD
丰田	CARLA
福特	Panosim、Carsim、RightHook
沃尔沃	VI-grade
雷诺	Oktal

资料来源: 公开资料, 课题组整理

2.3.3 自动驾驶解决方案商

自动驾驶解决方案商主要针对自身需求研发定制化仿真软件, 较少对外提供仿真服务, 但借助于充足的资金、人才集聚力及自身研发驱动力, 在自动驾驶仿真方面具有很强的创新能力。各领先自动驾驶解决方案商都有自身仿真测试软件, 如 Waymo、Cruise、小马智行、AutoX 等。

Waymo 借助大量虚拟仿真里程完善自动驾驶技术。Waymo 作为世界最领先的自动驾驶解决方案商, 其核心竞争力是 Carcraft 仿真软件系统。Carcraft 可以完成从场景采集、场景库建立、仿真、测试结果反馈等一系列流程。如 Carcraft 可以将测试车在真实道路上遇到的场景直接在模拟器中进行模糊化, 形成虚拟场景, 同时程序员也可以

将多种情况进行叠加，创造出各种极端场景。Carcraft 进行模拟后得到的数据又可以反馈给真实世界的测试车辆，如此循环迭代，使得 Waymo 自动驾驶车辆越来越完善。Carcraft 现有一支由 25000 台汽车组成的虚拟车队，这些虚拟汽车每天 24 小时运行在 Carcraft 仿真系统，每天可在虚拟世界行驶 2000 万英里的里程。截止 2020 年 4 月已完成了 150 亿英里的仿真测试里程，遥遥领先于其他公司。

Cruise 利用仿真系统（Matrix）与路测结合，重点突破车辆表现欠佳区域及危险场景。Cruise 自动驾驶仿真具备以下四个特点：第一，能对路测过程中车辆表现欠佳的区域，在仿真器中复现这段路线以提升自动驾驶软件的性能。第二，可以在仿真器中复现危险场景，如无保护左转、不遵守交通规则的行人与车辆等，验证自动驾驶汽车的应变能力。第三，能通过不断地训练让仿真器成为新的数据机，用仿真数据反哺路测工作。第四，仿真器既能保障乘客安全，也能兼顾舒适性。据 Cruise 介绍，其每天能完成 3 万次仿真测试。

小马智行实行软件快速迭代升级的自动驾驶仿真方式。新开发功能或者 bug 修复后，首先会在仿真系统进行模拟测试，测试完成后进行场地测试或者路测，如果测试结果不符合预期重新进行代码修改。如果测试结果符合预期，通常在一天内可以完成测试，然后每周会同步到所有测试车辆，并且每个工程师可单独、并行执行，保证了自动驾驶开发的快速迭代升级。小马智行仿真系统测试场景通过两种方式建立。第一，通过路测获得所有重要的场景并数字化处理收入场景库，后续所有代码的改动都会重新测试所有的重要场景。第二，由于现实中场景收集的局限性，仿真系统还可以创造一些场景。

AutoX 通过自动驾驶车辆与仿真大数据云平台协同，驱动自动驾驶落地。AutoX 拥有一支 RoboTaxi 自动驾驶乘用车队，搭载 AutoX 硬件系统，每天收集真实世界的海量数据。仿真大数据云平台通过对车队收集的真实世界海量测试运营数据进行数据加工和压缩、质量监督、自动标注、结构化测试，并通过仿真平台以 $\times 1000$ 倍量级对真实路采数据进行混合仿真，生产出更大量级、更高难度的虚实混合仿真数据。由此，AutoX 打造了可拓展、可衡量的分布式仿真平台，并且支持大规模手工和自动场景的产生。

2.3.4 仿真软件企业

仿真软件企业可分为传统仿真软件企业、初创企业两大类（见图表 13）。传统仿真软件企业由于技术积累比较深厚，进入自动驾驶仿真具有先天优势，而且合作伙伴较多，二次开发具有优势。初创企业由于起步晚，技术积累较弱，国内企业和国外的差距较大，但依靠雄厚的资金和人才集聚力，创业公司在自动驾驶仿真软件研发方面有望迅速崛起。

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。通过图表 13 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 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，但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，创新性不足。

图表 13 自动驾驶仿真软件企业及仿真软件

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, 2017 年 5 月 MSC 收购 VIRESD VTD
	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, 2018 年 5 月 Ansys 收购 Optis
	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, 可建立高逼真 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、数学分析
	Mechanical Simulation	CarSim	美国	1996	支持 SIL、MIL、HIL、DIL 仿真及动力学仿真, 包含 10 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, 2016 年 11 月西门子收购 Mentor
	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, 2019 年 7 月, 福特收购 Quantum Signal AI
	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, 2019 年 AB Dynamics 收购 rFpro
	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, 传感器仿真数量无限制, 具备自动测试并生成测试报告功能
初创企业	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
	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、自动驾驶场景设计编辑, 提供基于云的, 可扩展的模拟即服务 Simulation as a Service), 通过测试边缘场景增加系统可靠性
	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

	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
	沛岱	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
	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、时间、动力学和传感器的模拟
	Tass International	PreScan	德国	2013	支持 ADAS 仿真，环境仿真以及 MIL、SIL、HIL 仿真，可用于设计和评估 V2X、V2I 等通信应用，2017 年 9 月西门子收购 Tass International
	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

资料来源：公开资料，课题组整理

2.3.5 高校及科研机构

高校及科研机构主要应用自动驾驶仿真软件进行前瞻性、基础性研究，但很难形成成熟的商业化产品。国内从事自动驾驶仿真研究的高校及科研机构主要包括：清华大学、同济大学、北京航空航天大学、吉林大学、天津大学、长安大学、南京航空航天大学、武汉理工大学等。

武汉理工大学开发的仿真测试平台，可以实现 HIL、路径规划及跟踪测试、高速场景下的高速编队自动驾驶技术，并且实现了仿真场景构建、自动驾驶传感器性能及算法评价，为自动驾驶的量产评价提供指导。

吉林大学在基于场景的自动驾驶虚拟仿真测试体系方面，应用 Panosim 仿真平台实现了车辆及动力学模型、静态虚拟场景、动态虚拟场景、模拟环境传感、智能驾驶系统等的仿真，形成了完整的自动驾驶汽车虚拟仿真测试环境。

在国外，西班牙巴塞罗那自治大学、德国国家宇航中心开发的自动驾驶仿真软件已经得到应用。西班牙巴塞罗那自治大学开发的 CARLA，支持传感器、环境状态、动静态交通参与者、地图的灵活配置；德国国家宇航中心开发的自动驾驶仿真开源平台 SUMO，支持微观连续交通流仿真，可自动生成道路网络，也可外接其他交通模拟器，如 Vissim。

图表 14 高校及科研机构自动驾驶研究领域

单位名	研究领域
清华大学	智能汽车自动驾驶环境感知和决策、自动驾驶地图
同济大学	自动驾驶汽车测试与评价, 测试区规划、设计与建设, 测试示范区建设 V2X 网联化测试认证, 信息安全测试评价等
北京航空航天大学	汽车复杂行驶环境模拟与仿真、传感与感知、轨迹规划和智能决策, 汽车智能辅助驾驶及自主操纵
吉林大学	自动驾驶虚拟仿真测试, 涉及感知设备、V2X、驾驶人、混杂交通、车辆在环测试等
天津大学	智能驾驶的感知、决策、控制等核心算法以及仿真建模技术、测试评价技术、基础数据库技术、人工智能机器学习技术等
长安大学	车联网、交通图像与视频处理、道路交通智能检测技术与装备
南京航空航天大学	智能车辆控制策略设计和仿真技术, 增强现实的自动驾驶仿真系统
武汉理工大学	自动驾驶仿真测试平台, 可实现 HIL、路径规划及跟踪测试、高速编队技术、驾驶模拟器等
德国国家宇航中心	自动驾驶仿真开源平台 SUMO, 支持微观连续交通流仿真, 可自动生成道路网络, 也可外接其他交通模拟器
西班牙巴塞罗那自治大学	开源免费的自动驾驶仿真平台 CARLA, 支持传感器、环境状态、动静态交通参与者、地图的灵活配置

资料来源: 公开资料, 课题组整理

2.3.6 智能网联测试示范区

智能网联测试示范区建设已形成一定规模。目前全国有 10 余家国家级和数家省级智能网联测试示范区, 主要通过 5G、V2X 车路协同、模拟仿真、车联网等新技术的部署和应用, 为自动驾驶、网联通信供应商等提供系统测试服务, 推动汽车、信息通信、道路设施等内容的综合标准体系的建立。

为推动智能网联汽车的仿真测试工作, 已有企业和智能网联示范区开展了路测与虚拟仿真相结合的测试。如腾讯已和国家智能网联汽车(长沙)测试区合作, 建立了湖南省“智能网联汽车仿真实验室”项目, 基于高精度地图和模拟仿真技术, 对测试区的地理全貌进行数字化建模, 实现在仿真环境下进行安全、高效的智能汽车实验。西门子全球仿真及测试技术(成都)研发中心与中德智能网联汽车试验基地合作, 将为后者提供仿真测试技术平台, 助力智能网联汽车、车联网标准及测试验证发展。

图表 15 智能网联测试示范区

级别	名称	特点	支持单位	所在地
国家级	国家智能汽车与智慧交通(京冀)示范区	绿色用车、智慧路网、智能驾驶、便捷停车、快乐车生活、智慧管理六大应用示范	工信部	北京
国家级	天津西青国家级车联网先导区	智能网联三级测试体系, 标准制定验证, 行业协同管理, 车联网产业集聚, 车路协同系统打造、100+ 城市级车联网应用场景	工信部	天津
国家级	国家智能网联汽车应用(北方)示范区	国内首家寒区智能汽车和智慧交通测试体验基地, 可为辅助驾驶、自动驾驶和 V2X 网联汽车提供 72 种主测试场景和 1200 个子测试场景	工信部	长春

国家级	北汽盘锦无人驾驶汽车体验项目	综合运用 V2X、V2V、V2I 等诸多车联网相关技术	盘锦市大洼区人民政府	盘锦
国家级	国家智能交通综合测试基地	智能交通管理技术综合测试平台、交通警察实训平台与智能网联汽车运行安全测试平台	公安部 工信部	无锡
国家级	国家智能网联汽车（上海）试点示范区	服务智能汽车、V2X 网联通讯两大类关键技术的测试及演示	工信部	上海
国家级	浙江 5G 车辆网应用示范区（含杭州云栖小镇 LTE-V 车联网示范区、桐乡乌镇示范区）	杭州：基于 LTE-V 车联网标准的智能汽车的车—车、车—路信息交互场景 乌镇：以视频技术为核心的透明示范路，4G+ 的宽带移动测试网络，智能化停车应用场景	工信部	杭州
国家级	武汉智能网联汽车和智慧交通应用示范区	智能驾驶、智慧路网、绿色用车、便捷停车、交通状态智慧管理等多个应用示范	工信部	武汉
国家级	国家智能网联汽车（长沙）测试区	包括高速公路模拟测试环境，以及无人机起降跑道	工信部	长沙
国家级	广州智能网联汽车与智慧交通应用示范区	以 5G 试点网络和物联网为核心的产业生态体系	工信部	广州
国家级	福建平潭无人驾驶汽车测试基地	旅游体验试点，推进 5G 网络覆盖、人工智能、大数据等领域创新应用	平潭市人民政府	福州
国家级	重庆智能汽车与智慧交通应用示范区	智能驾驶、智慧路网、绿色用车、防盗追踪、便捷停车、资源共享、大范围交通诱导和交通状态智慧管理等八大领域应用	工信部	重庆
国家级	中国汽研智能网联汽车试验基地	中国首个大型综合智能网联汽车试验基地，包括智能网联汽车城市道路试验区、高速道路试验区、乡村道路试验区以及智能汽车数据中心	重庆市大足区人民政府	重庆
国家级	中德智能网联汽车试验基地	国际合作智能网联汽车自动驾驶试验基地	工信部	成都
国家级	国家智能网联汽车质量监督检验中心（湖北）	测试区构建了 56 种智能网联测试场景，形成了完善的整车 ADAS 试验测试能力，可开展 40 余项智能网联汽车的检验项目	襄阳市人民政府	襄阳
省级	浙江德清智能网联汽车封闭测试场	全国首个全县域开放的城市级自动驾驶测试区，可开展智能公交、智慧停车、无人物流、L4 自动驾驶网约车等示范应用	德清县人民政府	湖州
省级	常熟中国智能车综合技术研发与测试中心	包括典型真实道路交通环境和车联网设施等外场测试场地	常熟高新区	苏州
省级	芜湖百度“全无人驾驶汽车运营区域”	在技术研发、车辆测试、试点运营、标准完善、产特推动等方面为百度创造条件	芜湖市人民政府	芜湖
省级	银川智能网联汽车测试与示范运营基地	涵盖开放测试区、封闭测试区、虚拟场景测试实验室等	银川冰滨新区管委会	银川
省级	深圳智能网联交通测试示范区	构建从仿真测试，到封闭、半封闭环境测试，再到真实道路验证的完整流程，支持智能网联汽车研发，以及未来交通解决方案的落地	深圳市人民政府	深圳

资料来源：公开资料，课题组整理



第三章

自动驾驶仿真测试平台环境

『 3.1 仿真测试平台功能需求 』

对自动驾驶算法的开发来说，测试验证手段必不可少。引入虚拟仿真平台进行自动驾驶测试的核心目的，正是为了弥补实车测试的不足，提高自动驾驶汽车测试的安全性并节省测试时间和成本，快速推动自动驾驶汽车落地。因此，自动驾驶仿真面向的主要客户是有自动驾驶开发需求的汽车厂商、算法公司以及各类汽车测试场，从满足客户使用的需求来讲，自动驾驶仿真测试平台至少应该具备以下功能。

3.1.1 满足自动驾驶感知、决策规划、控制全栈算法的闭环仿真测试

自动驾驶仿真测试平台的功能需求首先源于自动驾驶汽车自身的工作原理。当前自动驾驶汽车的普遍技术架构，是通过摄像头、激光雷达、毫米波雷达等传感器识别车辆周围的环境信息，然后由人工智能结合感知信息并依据以往经验做出决策，自主控制转向和速度，使得车辆能够安全可靠的行驶，到达预定目的地。

总体来说，自动驾驶核心算法包括感知算法、决策规划算法、控制算法三大环节。相应的，自动驾驶仿真测试平台也应该具备完成上述三个算法的仿真测试的能力，感知算法仿真需要高还原度的三维重建场景和精准的传感器模型；决策规划算法的仿真需要大量的场景库为支撑；控制算法的仿真需要引入精准的车辆动力学模型，这些内容会在下一节，技术架构中着重介绍。

当然不同的仿真平台针对上述三种算法可以有不同的侧重点，比如有的仿真平台专注于决策、控制算法的仿真，会直接给测试车辆输出完美的传感器信号，需要感知算法仿真时可以利用其它仿真平台进行联合仿真，但这样容易造成仿真结果不一致的情况。现在越来越多的自动驾驶开发团队倾向于用一套仿真系统满足单一算法开环以及全算法闭环的使用需求，这里留待后面的章节再详细展开。

3.1.2 满足汽车 V 字开发流程

自动驾驶可以看作是汽车发展的高级形态。从上世纪 50 年代至今，汽车的控制系统一直在不断发展完善，从起初的发动机控制逐渐演变到底盘控制，之后到车载信息娱乐系统控制，再到 ADAS 辅助驾驶以及更高等级的自动驾驶，汽车系统结构越来越复杂，迭代更新速度不断加快。为了保证系统的稳定性和更新频率，汽车行业诞生了一套先进的测试理论和流程来保证整个系统开发的有效性和高效性，我们称这套流程为 V 字开发流程或者 V 模型。

V 字开发流程是在快速应用开发（Rap Application Development）模型基础上演变而来，包括功能设计、快速控制原型、代码集成与测试、HIL 测试以及实车标定。不同于传统的正向开发过程，V 模型强调软件开发的协作和速度，它将软件实现和验证有机地结合起来，使软件生命周期中每一个开发活动都对应一个测试活动，并且两者是同时进行的，可以在保证较高的软件质量情况下缩短开发周期。

针对自动驾驶的仿真测试同样必须满足汽车的 V 字开发流程，具备覆盖 MIL（模型在环）、SIL（软件在环）、HIL（硬件在环）、VIL（车辆在环）全流程验证的能力。除了通过纯软件方式接入感知、决策、控制系统完成闭环测试之外，还需要通过仿真环境，结合部分硬件系统的计算结果进行测试，使软件和硬件的兼容性和功能完整性得以验证。

3.1.3 加速自动驾驶算法迭代升级

2020 年初，北京市自动驾驶车辆道路测试第三方服务机构“北京智能车联产业创新中心”正式对外发布《北京市自动驾驶车辆道路测试报告（2019 年）》。截至 2019 年底北京共有 6 家互联网企业、6 家主机厂、1 家地图厂商，共计 77 辆汽车，参与了北京市自动驾驶车辆一般性道路测试，总路测里程达到了 104.02 万公里。此外，长沙、上海、深圳等全国十余个城市也都规划了用于自动驾驶测试的道路。在欧美等发达国家，自动驾驶发展的更早，开放测试道路里程和实际测试里程都比国内多得多。

目前实际道路测试的规模还是远远不能满足自动驾驶研发测试的需要，这表明行业主流的自动驾驶玩家已经基本完成了算法架构，距离商业化运用只差积累足够的测试数据来对算法进行优化。从这个角度来说，仿真测试平台

的高效率也是用户核心的功能需求。

影响自动驾驶仿真测试效率的因素有很多，最重要的有两个。其一，仿真系统是否具备快速自动化生成测试场景的能力。因为，仿真平台的测试场景源自于真实的道路采集数据，采集需要耗费大量的时间和成本，如果无法基于真实数据自动化生成场景，逐个采集将会大大降低测试效率。

其次，依靠本地逐个运行测试场景的测试方式，效率依然不够。用户最理想的使用方式是本地调试 + 云端加速仿真相结合，在本地将算法调试完毕后，上传到云端快速进行大量的回归测试集验证，将结果返回到本地，分析自动驾驶算法在哪些场景表现良好，哪一类场景表现差，再针对性地做精细调试，推动算法的快速迭代，这需要仿真测试平台具备云端并行加速的能力。

『 3.2 仿真测试平台技术架构与能力 』

3.2.1 虚拟场景构建

自动驾驶汽车的仿真测试，首先需要模拟构建出与真实世界一致的车辆运行场景，而场景的构建可以分为静态场景构建和动态场景构建两个层面。

1. 静态场景还原

静态场景构建的作用是还原出场景中与车辆行驶相关的静态元素，例如道路（包括材质、车道线、减速带等）；静态交通元素（包括交通标志、路灯、车站、隧道、周围建筑等）。最常用的手段是基于高精度地图及三维重建技术完成场景的构建，或者基于增强现实的方法来构建场景。

基于高精度地图及三维重建技术构建场景，首先需要采集点云、全景图、测绘矢量等非结构化的测绘数据，并将测绘数据结构化，构建厘米级的高精度地图，其中包含路面、道路标线、交通标识等信息，之后以此为基础，使用三维建模软件建立基础设施与周边环境的可视化数字模型。

在各种构建方案中，这是一种低成本且节约时间的技术手段，而且高精度地图拥有丰富的道路元素数据信息，可以帮助汽车预知路面复杂信息，规避潜在的风险。腾讯自动驾驶仿真平台 TAD Sim 采用的就是这种方案，而且由于腾讯完成了对全国高速和快速路的高精度地图采集，所以 TAD Sim 天然支持全国高速、快速路的自动驾驶仿真测试。

2. 动态场景构建

广义的动态场景元素包括动态指示设施、通信环境信息等动态环境要素，以及交通参与者（包括机动车行为、非机动车行为、行人行为等）、气象变化（雨、雪、雾等天气状况）、时间变化（主要是不同时刻光照的变化）等。动态场景构建是为了在静态场景的基础上，复现出场景中的动态元素，并且使得这些元素的动作及其产生的影响严格遵循现实世界的物理规律以及行为逻辑，在这个层面游戏技术（游戏渲染、物理引擎、Agent AI 等）有非常重要的作用。

首先游戏引擎的渲染能力可以为仿真场景渲染出非常逼真的光影效果，以及风、霜、雨、雪等天气条件的变化。同时借由游戏引擎中物理引擎的力量，可以为仿真世界定义一套与现实世界一样的物理规则，让光照条件和天气条件的变化，包括各种交通元素的行为对仿真场景产生的影响与现实世界一致，这对车辆感知算法和控制算法的仿真来说非常重要。腾讯 TAD Sim，引入了世界知名的游戏引擎 UE4，得到了更好的环境仿真效果，使传感器的仿真结果更加精准。

场景中影响车辆运行的动态元素除了天气、光照等气象条件，还有测试主车之外其他交通参与者的行为。一种

常用的仿真方式采用回放路采数据再现交通元素的行为，这种办法固然能保证元素行为符合现实逻辑但无法高效构建场景库，满足测试效率需求。利用路采数据在满足交通元素符合逻辑的情况下自动化生成更多用于测试的场景库，成为了自动驾驶仿真研究的一大课题。

采用游戏中的 Agent AI 技术是一个解决方案，在游戏中 Agent AI 的作用主要是定义 NPC（非角色玩家）的行为，每个 NPC 都需要有自己的行为逻辑。用同样的技术，以大量路采数据训练交通流 AI，可以快速生成真实度高、交互性强的交通场景，构建庞大的场景库，提升测试效率。

3.2.2 感知系统仿真

感知系统的仿真，可以分为三个层次，其一直接仿真传感器收到的信号，例如直接仿真摄像头检测到的光学信号，或者雷达超声波和电磁波信号，这种方法叫做物理信号仿真；其次把传感器探测的单元拆掉，直接仿真控制电控嵌入式系统中专门的数字处理芯片的输入单元，这叫做原始信号仿真；最后一种传感器目标仿真，传感器感知和决策如果是分为两个不同层级的芯片来做，那么可以将传感器检测的理想目标直接仿真到决策层算法输入端。

感知系统仿真的对象主要包括摄像头、毫米波雷达、激光雷达三大类主流车端传感器。影响感知系统仿真结果的两大主要因素，首先是仿真场景重建的真实性，这一点在上一节虚拟场景构建中已经提及；另一个因素是各类传感器模型，在相同的仿真环境中，传感器模型越精确，仿真结果越接近现实。

1. 摄像头仿真

摄像头仿真的一般方法是基于环境物体的几何空间信息构建对象的三维模型，直白一点就是生成逼真的图像。根据物体的真实材质与纹理，并通过计算机图形学对三维模型添加颜色与光学属性等，来模拟实现图像合成。通常情况下，颜色、光学属性等元素会基于游戏渲染引擎来得到，百度阿波罗采用 Unity 3D，腾讯 TAD Sim 引入了虚幻引擎 UE4。

摄像头仿真通过坐标系转换的方法，将三维空间中的点通过透视关系变换为图像上的点。之后，还需要对相机镜头的结构与光学特性，内部数据采集过程进行仿真，例如焦距、畸变、亮度调节、Gamma 调节、白平衡调节、色彩空间、景深、高动态范围（HDR）色调的调整等。

摄像头仿真每一帧的原始数据一般可以使用 RGB 或 YUV 来表示。如需把仿真结果通过网络实时传给自动驾驶系统，一般可使用 H264 压缩成视频流，减少传输带宽。摄像头仿真需要障碍物的真值信息，包括位置、朝向、包围盒、速度和类型等。除了对象检测，摄像头的仿真结果也会被用来训练其他计算机视觉算法，包括目标跟踪和语义分割等。

2. 毫米波雷达仿真

毫米波雷达仿真一般会根据配置的视场角和分辨率信息，向不同方向发射一系列虚拟连续调频毫米波，并接收目标的反射信号。不同车辆的雷达回波强度可使用微表面模型能量辐射计算方式，由车辆模型以及车辆朝向、材质等计算。

同一个障碍物会被多个调频连续波探测到。对于毫米波雷达目标级仿真，则可以根据障碍物的径向距离、距离分辨率和角度分辨率等信息对同一个障碍物的点进行聚类并返回最终仿真结果。

毫米波雷达仿真一般需要支持更改毫米波雷达安装位置、角度、探测距离、探测角度、角度和距离分辨率、噪声参数等。对于某些兼有长距和中距探测功能的毫米波雷达，仿真时则需要同时支持两者的参数设置。

3. 激光雷达仿真

激光雷达仿真的思路是参照真实激光雷达的扫描方式，模拟每一条真实雷达射线的发射，与场景中所有物体求交。以一个 64 线、水平分辨率为 0.4°、最大探测距离为 120 米的雷达为例，该雷达每一帧会发射出 57600 条射线

($64 \times 360 / 0.4$) 与场景中所有物体求交, 如果求得的交点位于最大探测距离内, 则为有效点, 对于 10HZ 的雷达来说, 每秒需要发射 576000 条射线。针对微电子机械系统激光雷达 (MEMS), 技术方案原理上与上述方法一致, 主要差异是, 水平方向扫描不再是 360° , 而是可以指定扫描的水平角度范围。

激光雷达反射强度和不同物理材质对激光雷达所使用的近红外光线反射率有关。反射强度受到障碍物距离、激光反射角度以及障碍物本身的物理材质影响。仿真时需要给场景资源设置合适的物理材质, 包括各种道路、人行道、车道线、交通牌、交通灯、汽车、行人等。每一种物理材质的激光反射率都不相同, 可以使用仪器提前测得每一种物理材质的激光反射率, 并记录下来, 也可以参照某些真实激光雷达的做法, 将最终反射强度归一化到 0~255。

3.2.3 车辆动力学仿真

自动驾驶汽车在仿真测试中, 需要借助车辆动力学模型模拟车辆来客观评价决策及控制算法。因为, 复杂的车辆模型, 可以保证车辆有良好的仿真精度, 使被控制对象的反应更贴近真实世界。

车辆动力学模型是基于多体动力学搭建的模型, 其中包含了车体、悬架系统、转向系统、制动系统、动力系统、传动系统、车辆动力学系统、硬件 IO 接口等多个真实部件的车辆模型。将这些被控对象模型参数化之后, 就可以把真实的线控制动、线控转向系统和智能驾驶系统集成到大系统中共同做仿真测试。

当仿真端接收自动驾驶系统控制模块给出的控制信号, 主要包括油门、刹车、方向盘、档位等, 产生更新后的车辆位置和姿态底盘总线参数, 输出给自动驾驶的各个模块, 来模拟车辆的整体行为。此外, 在测试 L2、L3 辅助自动驾驶时, 也可以接入车辆的各个模块, 例如转向、动力传动、制动等进行直接的控制。

目前, 专业的车辆动力学仿真软件, 有 CarSim、CarMaker、VI-Grade、VeDYNA 和 PanoSim 等, 仿真平台可以接入这些成熟的车辆动力学模型进行测试, 能获得比较逼真的控制效果, 当然目前有很多仿真平台也在自行开发车辆动力学模型。比如, 腾讯自动驾驶仿真平台 TAD Sim 支持 27 自由度的车辆动力学模型, 也支持接入 CarSim 这类业内顶尖的车辆动力学模型进行仿真测试。

3.2.4 云加速仿真

仿真系统在进行仿真任务时需要访问大量采集或者生成的数据, 并根据生成的数据利用 CPU 和 GPU 资源对数据进行再处理并还原, 或者对已经结构化的数据进行 GPU 渲染再现。这些仿真任务都需要依赖强大的计算和存储能力。随着仿真内容的增加, 单个计算机的性能很快成为了瓶颈, 一个计算节点不可能独立完成仿真任务。这就需要使用一种机制将仿真任务分配到多个机器上, 并且让所有机器协同工作, 这样做能够降低单个机器的性能需求, 从而使得大规模仿真任务得以实现。

基于云计算的分布式概念正好能够帮助自动驾驶仿真系统达成这样的目的, 分布式计算是随着互联网行业的快速发展而产生的。随着网络速度的提高, 服务器端对数据的存储能力和算力需求逐渐增加, 传统的服务器需要升级硬件满足需求。集中式的硬件系统成本过高, 于是分布式概念应运而生。分布式框架可以将计算和存储任务进行拆分, 让互相连接的每一台机器承担一部分的计算和存储任务, 并在需要的时候进行数据的同步和收集, 降低单个节点成本, 提供系统整体的计算能力和存储容量。

仿真模拟多建立在对现实世界的模拟之上, 需要依赖现实时间的流逝, 但随着硬件性能的提升, 在某些模拟任务时, 计算机在按照真实时间进行模拟仿真时并没有消耗其全部的性能。这时如果能够让计算机模拟的速度以高于真实时间的速率进行, 那么将能够更好利用硬件优势, 并提高模拟效率。

在计算和存储能力允许的情况下, 仿真节点可以按照更高的频率进行仿真, 并在更短的时间内完成仿真任务。但是为了保证仿真结果的一致性, 各个仿真节点的加速程度又必须保持一致。因此为了同时满足动态时间和数据一致性的需求。仿真系统需要引入虚拟时间用于节点之间的同步, 而非真实时间。虚拟时间的优势在于不依赖真实时间, 可快可慢。虚拟时间根据当前仿真任务的完成情况随时控制整个系统的运转速度, 从而使得每一个节点在完成任務的同时保证整个系统的数据一致性。

『 3.3 仿真测试平台核心功能 』

3.3.1 超高还原度的仿真场景

自动驾驶仿真技术是计算机仿真技术在汽车领域的应用，类似其它通用的仿真平台，必须尽可能真实的还原现实环境，结合自动驾驶汽车的工作原理，还原应该包含三个层面分别是：几何还原、物理还原以及逻辑还原。

1. 几何还原

场景的几何还原，主要是作用于三维场景仿真以及基于三维场景仿真的传感器仿真。具体来说，几何还原指的是如何尽可能好的还原出与现实世界各种属性都一致的三维场景，而且依据使用需求的不同还原程度以及使用方式可以有相应的差异。比如，如果需要运行结果比较好的传感器仿真，则需要非常精确的对三维场景进行几何还原，同时有着比较好的传感器仿真模型，才能保证传感器仿真无限接近现实世界的仿真结果。如果测试者并不关注传感器仿真，而主要是想要对决策控制算法进行仿真测试，那么对于周围的环境场景就不需要非常精确的进行几何还原，但是需要对路面的道路属性进行比较精确的还原，才能保证汽车控制效果的真实性。

2. 物理还原

在场景的几何还原的基础上，仿真测试平台还需要完成物理还原，让仿真世界重现真实世界的物理运动规律。其主要作用是在重建的三维场景基础上运行自动驾驶的控制算法，以及车辆动力学的仿真，使车辆在仿真环境下遭受干扰时做出回应以及车辆自身行为产生的后果都和真实世界保持一致。比如直射的阳光会对摄像头造成干扰，雨雪天气会延长刹车距离，汽车碰到墙体将无法穿越等，因此物理还原是控制算法必须具备的环节，舍此便无法评估自动驾驶决策控制算法的真实效果。

3. 逻辑还原

基于几何还原和物理还原两个层面，自动驾驶虚拟仿真平台还需要完成逻辑还原，逻辑还原的主要作用是真实的生成场景内的各种元素的逻辑行为，让交通流车辆、行人、非机动车等所有交通元素都遵循其在现实世界中的一般运动规律。逻辑还原主要面向决策规划算法的仿真，从逻辑层面为决策规划算法的仿真测试自动生成真实度极高的测试场景。

3.3.2 利用路采数据生成交互性强和还原度高的交通场景

自动驾驶的仿真测试，需要以大量的路采数据为基础构建场景库，无论是 OEM 厂商还是科技公司都会组建车队去采集大量的道路数据。这些数据有很多种利用方式，最简单、直白的使用方式是回放式仿真，将采集回来的数据直接回放一遍，评价自动驾驶算法是否能顺利通过这些场景。

纯回放式的仿真只能满足开环仿真的使用需求，因为其中所有场景元素的行为都是固定的，当自动驾驶算法发生改变，导致主车行为发生变化之后，场景元素不会因为主车行为的改变而做出相应的反应，这时路采数据就无法继续使用了。

如果每测试一个场景都需要重新采集数据，那依然会耗费大量的时间和人力成本，自动驾驶仿真平台的实际价值也就会被大大削弱。因此以更高效的方式利用路采数据，智能化、自动化的生成还原度高、交互性强的交通场景，快速构建场景库，也是行业对自动驾驶仿真测试平台的功能要求之一。

3.3.3 云端大规模并行加速，提升仿真测试效率

几何、物理、逻辑三个层面的还原，再加上自动化生成场景的能力，构建了自动驾驶仿真系统的基本属性，可

以很便捷又低成本的完成自动驾驶感知、决策规划、控制算法的闭环仿真。但是自动驾驶汽车是由算法在操控，为了证明一套算法的完备性，至少需要对数十万测试场景进行回归测试，依靠本地测试逐个运行数量如此庞大的测试场景，并不能在根本上解决自动驾驶测试的效率问题，因此云端高并发运行测试场景，是自动驾驶仿真软件的核心竞争力之一。

以分布式架构为显著特征的云计算技术飞速发展，为自动驾驶大规模云端仿真测试提供了支撑，行业产生了更多高效的云端测试方法。腾讯自动驾驶仿真平台 TAD Sim 探索出了一种城市型云仿真与场景型云仿真结合使用的测试方法，比较具有代表性。

在 TAD Sim 中加载一个城市级别的高精度地图，在其中部署大量自动驾驶主车以及交通流元素，进行 7×24 小时的高并发测试，迅速找出自动驾驶算法处理不好的场景，并将场景截取下来保存到场景库，之后通过场景型云仿真测试完善算法，让算法在仿真城市中更加游刃有余，两种仿真模式相结合可以使测试效率提升数倍。



第四章

场景库体系建立与开放

『 4.1 自动驾驶测试场景库体系的搭建 』

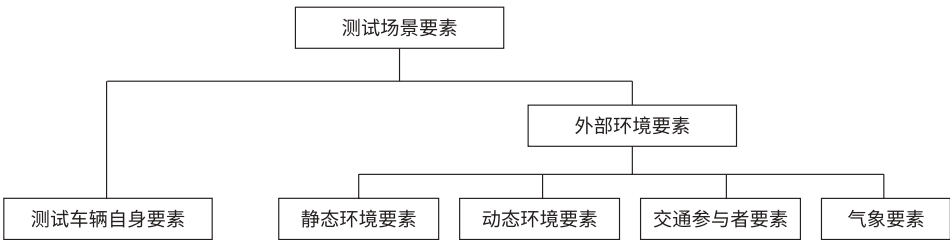
自动驾驶测试场景库是智能网联汽车研发与测试的基础数据资源,是评价智能网联汽车功能安全的重要数据库,是定义自动驾驶汽车等级的关键数据依据。自动驾驶测试场景数据库主要通过虚拟仿真环境及工具链进行复现,建设虚拟场景数据库是连接场景数据与场景应用的关键桥梁。

由于基于里程的自动驾驶汽车测试存在时间长、成本高、效率低等问题,形成目前以场景测试为主的自动驾驶测试技术路线。随着人工智能技术的发展,更高级别的自动驾驶汽车成为可能,对测试场景也提出了更多要求。从ADAS只需满足特定场景下的功能要求,到有限条件的自动驾驶(L3)系统、高度自动驾驶(L4)、完全自动驾驶(L5)系统等需要满足各类场景的功能要求,导致自动驾驶汽车测试与验证的场景数量呈几何级增加。总之,评价自动驾驶系统算法最重要的标准就是测试其是否能够处理足够多的场景,自动驾驶系统能处理的场景覆盖范围越大,自动驾驶汽车可行驶的边界就越广泛。

4.1.1 场景库的概念

场景是自动驾驶汽车与其行驶环境各组成要素在一段时间内的总体动态描述,具有无限丰富、极其复杂、难以预测、不可穷尽等特点。自动驾驶测试场景库是由满足某种测试需求的一系列自动驾驶测试场景构成的数据库。测试场景包括测试车辆自身要素及外部环境要素,外部环境要素又包括:静态环境要素、动态环境要素、交通参与者要素、气象要素等。

图表 16 测试场景要素分类



资料来源：公开资料，课题组整理

- ◆测试车辆自身要素包括：重量、几何信息、性能信息、位置状态信息、运动状态信息、驾驶任务信息等；
- ◆静态环境要素包括：障碍物、周围景观、交通设施、道路等；
- ◆动态环境要素包括：动态指示设施、通信环境信息等；
- ◆交通参与者要素包括：机动车、非机动车、行人、动物等；
- ◆气象要素包括：环境温度信息、光照条件信息、天气情况信息等。

图表 17 测试环境要素分类

要素分类	属性	具体指标
测试车辆自身要素	重量	—
	几何信息	长、宽、高；重心位
	性能信息	最大车速；最大加速度；最大爬坡度；百公里油耗
	位置状态信息	坐标信息；车道位置信息
	运动状态信息	横向运动状态信息；纵向运动状态信息

	驾驶任务信息	感知识别类、路径规划类、人机交互类、联网通信类驾驶任务信息
静态环境要素	障碍物	正障碍；负障碍
	周围景观	花草树木；建筑
	交通设施	道路辅助设施；道路交通标线；道路交通标志
	道路	桥涵；匝道；交叉口；路表；路段
动态环境要素	动态指示设施	交通信号灯；可变交通标志；交通警察
	通信环境信息	信号强度；电磁干扰；信号延迟
交通参与者要素	其他车辆	机动车；非机动车
	行人	步行行人；跑步行人；残疾人
	动物	猫、狗等
气象要素	环境温度信息	—
	光照条件信息	光线强度；光线角度
	天气情况信息	雨、雪、雾、霾、风、冰雹

资料来源：中汽数据有限公司，课题组整理

为使测试场景库搭建合理，测试有效，维护方便，要求测试场景库达到真实性、交互性、扩展性、无限性、批量化、自动化等条件。

真实性。静态、动态、交通参与者、气象等要素可高度还原相应的现实情况，包括所有的关键信息，可支持高精度的传感器仿真。此外根据测试需求，选择的测试场景应能在统计学上覆盖现实交通中部分典型现象，从而在某种程度上替代道路测试场景。

交互性。场景库要素包括测试车辆、静态环境、动态环境、交通参与者、气象等，而且各个场景要素之间存在较强的耦合关系，即一个要素发生变化可能会对其他所有要素产生影响。在自动驾驶测试场景构建中，外部环境要素和测试车辆互动，不同要素之间协调运作才能保证自动驾驶测试的真实性和可靠性。

无限性。测试场景库主要由测试用例经虚拟仿真建模得到，测试用例来源于功能场景与逻辑场景，由于场景参数分布的连续性以及场景元素排列组合的多样性，测试用例是不能穷举的。随着场景个数的不断积累，测试场景数据库不断丰富，测试场景库中场景数量也将是无限的。

扩展性。测试场景中测试车辆、静态环境、动态环境、交通参与者、气象等要素的不同种类、属性、关系可构成不同场景，因此需要首先明确场景的属性和关系。在此基础上，通过改变某一属性的值，如天气状况、光照条件、车辆及行人数量等，可扩展更为丰富的测试场景。

批量化。借助虚拟仿真工具链开发的标准驾驶场景数据接口，能够实现测试用例的批量化导入及建模，并利用高性能仿真服务器实现批量化的仿真测试，节约时间成本与人力成本。

自动化。测试场景库具备测试评价功能，当仿真测试结束后，结合被测车辆的表现，自动化给出综合评价结果和指标。

4.1.2 场景数据来源

场景数据来源主要包括三个：真实采集数据、模拟数据、根据真实场景数据合成的仿真数据。

真实采集数据。公共道路场景包含人 - 车 - 路 - 环境等信息，为完整呈现场景内容，需要采集车辆自身要素、静

态环境要素、动态环境要素、交通参与者要素、气象要素等，具体采集信息指标见图表 17 所示。采集流程为：基于采集的传感器、高精地图等信息，根据数据存储标准转化为静态场景数据；基于采集的交通传感器、路况等信息，根据数据存储标准转化为动态场景数据；基于数据标准将静态和动态场景整合为虚拟场景的数据格式，并存储该场景的关键信息，最终形成真实采集场景数据。

模拟数据。应用软件可以直接构建高速公路、大型环岛、停车场等虚拟交通环境，在交通环境中使用软件提供的现成模型，模拟机动车、行人、非机动车等交通参与者的交互行为。利用不同交通参与者的行为变化，可以衍生出众多场景，以充分测试自动驾驶车辆。例如如果发生行人闯红灯时，软件可模拟出交通参与者的行为变化。

根据真实场景数据合成的仿真数据。真实采集的场景数据可以经过场景理解、特征提取、场景聚类、场景生成等步骤创建无限的仿真场景数据。场景理解是对采集的图像进行归类；特征提取是对场景中的动态、静态元素进行特征提取，然后进行参数化描述；场景聚类是对场景进行分类、聚类处理；场景生成是对场景参数进行人工编辑，生成新的场景，提高场景覆盖率。

4.1.3 场景的自动化生成

目前由于自动驾驶测试的场景库还无法覆盖所有场景，如果单纯采用真实路采数据将耗费大量的时间与成本，因此场景的自动化生成是非常必要的。

测试场景要素中车辆自身要素可以提前拟定，静态环境要素、动态环境要素、交通参与者要素、气象要素等外部环境要素可以实现自动化生成。

场景静态环境要素可以先通过真实道路采集实现构建，因为静态环境要素类别有限，路采数据经构建渲染直接导入场景库。而动态环境要素和交通参与者等动态要素的行为逻辑经对抗式生成网络学习后，可以模拟生成无限的同类要素。例如中国驾驶员的打转向灯、并线、加减速等驾驶习惯和驾驶行为，通过对抗式生成网络学习可以模拟生成中国特色的交通参与者，模拟出无限的动态要素场景，这是区分中国场景库和国外场景库的关键点。气象条件连续变量离散化之后可以在一定值域空间里任意改变，从而变化出无限的场景。

因此，由真实路采数据组合而成有限的道路场景，结合 AI 技术生成的无限动态交通流和离散化后的无限气象条件，可以生成无限的自动驾驶测试场景，这样可以提高路采数据利用率和测试效率。

4.1.4 场景数据格式标准

场景自动化测试、场景复用（场景数据交换）是自动驾驶测试的大势所趋，而这都需要标准场景文件的支持。目前国际上通用的场景数据格式有 OpenDRIVE 及 OpenSCENARIO，OpenDRIVE 实现地图解析，OpenSCENARIO 实现场景转换。对于采用其他格式场景数据的仿真工具，也应该配备相应的场景文件解析接口，实现与标准数据格式的转换。

OpenDRIVE 地图解析工具特色功能包括：

- ◆可将第三方仿真软件生成的地图格式转换为 OpenDRIVE 标准格式文件；
- ◆基于 OpenDRIVE 地图格式文件，可实现静态路网快捷编辑功能。

OpenSCENARIO 场景转换工具主要特色功能包括：

- ◆兼容 ASAM（德国自动化及测量系统标准协会）推出的最新 OpenSCENARIO 2.0 场景标准 [1]，可实现基于 OpenSCENARIO 的动态场景编辑与开发；
- ◆支持基于 OpenSCENARIO 语言的可编程仿真场景工具可将采集驾驶场景数据自动生成动态场景；
- ◆支持格式转换，可以将其他场景文件与 OpenSCENARIO 格式文件相互转换。

*[1] 2020 年 3 月 18 日，德国自动化及测量系统标准协会（ASAM）召开网络会议，正式发布 OpenSCENARIO 标准。本次会议共发布 OpenSCENARIO V1.0 以及 OpenSCENARIO V2.0 Concept 两个版本的标准，OpenSCENARIO V2.0 在包含 OpenSCENARIO V1.0 全部内容

的基础上，还增加了用于描述场景动作的领域特定语言 DSL 和多层级逻辑场景描述等内容。两版标准计划于 2022 年实现版本合并。

4.1.5 场景库的搭建流程

在以场景为驱动的自动驾驶研发测试中，测试场景的科学、有序搭建，能有效支撑自动驾驶的研发测试工作。通过自动驾驶的研发测试反过来也能给场景库提供反馈意见，丰富场景库，形成研发测试与场景库搭建的闭环。

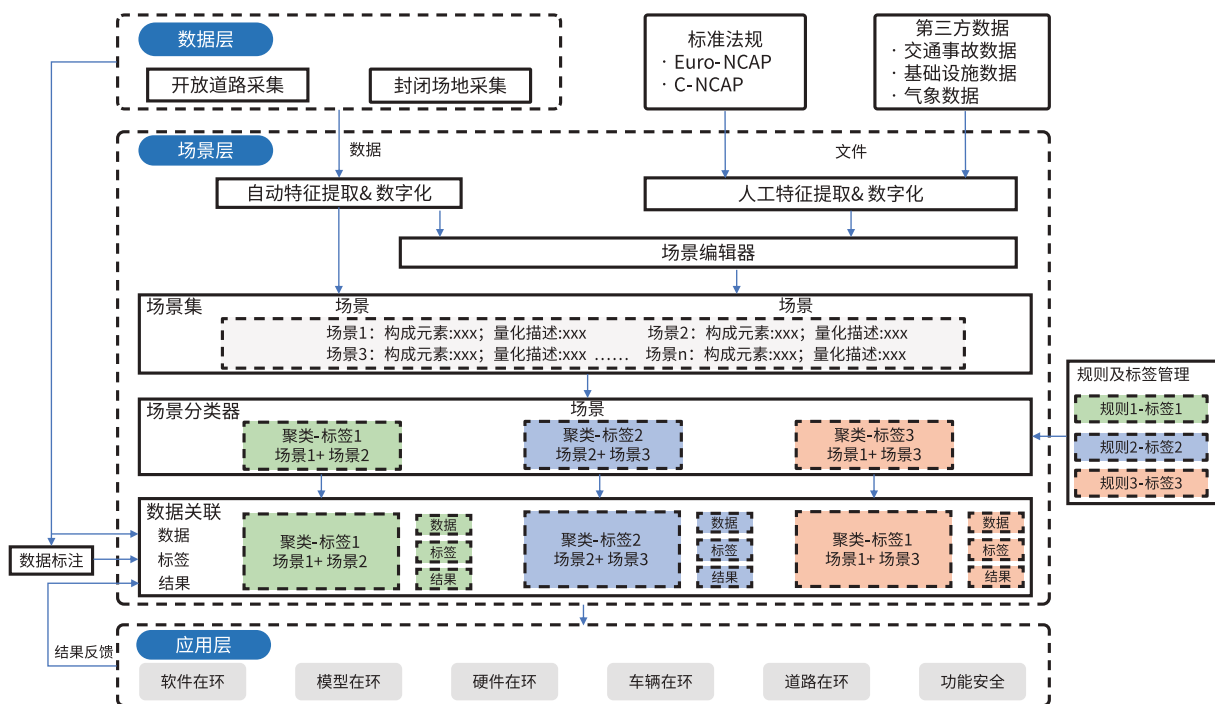
自动驾驶测试场景可分为三层结构：数据层、场景层、应用层。

◆数据层负责从开放道路、封闭场地等采集场景构建所需数据，然后利用自动化处理工具对数据进行特征提取和数字化。场景数据也可以来自于国家级行业标准法规、交通事故数据库、基础设施数据、气象数据库等，进行数据格式和参数统一后导入场景层。

◆场景层负责对采集完成的数据进行处理，如场景理解、特征提取挖掘等，统一格式之后导入场景库。在此基础上，需要围绕场景进行聚类、生成、优化处理，从而构成不同场景。一般仿真软件也可以使用地图编辑器和场景编辑器来编辑人工定义场景，但是这种方法在场景丰富性和真实性上表现较差。

◆应用层通过调用场景库中的场景为虚拟场景验证、实车场景验证服务，确认场景的真实性、代表性、有效性。应用层还会将测试结果反馈给场景库，对场景的分析挖掘方法进行修正，或者根据需求重构生产场景，更新补充完善场景库。

图表 18 自动驾驶测试场景构建流程



资料来源：中汽数据有限公司，课题组整理

『 4.2 道路测试到场景转化 』

目前世界上道路测试及仿真测试最领先的企业非 Waymo 莫属，其道路测试和仿真测试里程数均遥遥领先于竞争对手。截止 2020 年初，Waymo 自动驾驶公开道路测试里程达到 2000 万英里，其中 2019 年就完成了 1000 万英里。截止 2020 年 5 月，Carcraft 仿真系统仿真里程总数已经达到了 150 亿英里。目前 Waymo 已在美国各城市部署了约 1000 辆汽车，并计划在未来一两年再增加数万辆。

Waymo 基于道路测试实现仿真场景的搭建。Waymo 通过在公共道路和封闭测试场地 Castle 进行道路测试，积累成千上万的场景数据，然后创建成虚拟的数字场景。在虚拟场景中，可以通过修改参数生产更多的场景，让虚拟汽车在每一个场景中进行学习。以四向停车点为例，Carcraft 可以生成 800 个场景。

道路测试转化成仿真测试场景，需要经历四个步骤：场景理解、特征提取、场景聚类、场景生成。

场景理解。目前场景采集主要以视觉感知为主，场景理解就是要将采集的图像的像素点进行归类，然后进行目标检测、区域标注、3D 重建。随着机器学习技术的发展，基于机器学习的场景理解可以实现特征表示、模型学习、推理算法、理解评价等，基于机器学习的场景是未来发展方向。

特征提取。在场景理解的基础上，对场景中的动态、静态元素进行特征提取，然后进行参数化描述。如果需要挖掘自然驾驶场景、危险场景等，可以梳理对应场景的特征元素及特征量，从原始交通场景进行数据挖掘可以获取相应的场景数据。

场景聚类。通过场景理解、特征提取后就可以形成大量的场景数据，如果不进行归类处理，场景将处于杂乱无章的状态。这时候需要对场景进行分类和聚类，让具备相同特征信息的场景进行聚类，反之进行分类，这样可以提高场景的测试效率，方便场景库的管理。

场景生成。道路测试覆盖的场景很有限，难以覆盖所有场景。根据道路采集数据进行场景复现，可以使场景重现真实交通中的自然驾驶场景及危险工况场景。为了提高场景覆盖率，可以根据场景元素的分类和特征，分析不同元素对自动驾驶车辆的影响，基于元素的关联关系或人工经验对场景进行重新组合，可以生产新的场景。需要注意的是，在此过程中需要通过推演归纳进行严谨的元素组合，尽量使场景的覆盖率最大化。

『 4.3 国内典型场景库 』

国内目前有中汽数据有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、腾讯、百度等公司建立了自己的场景库。

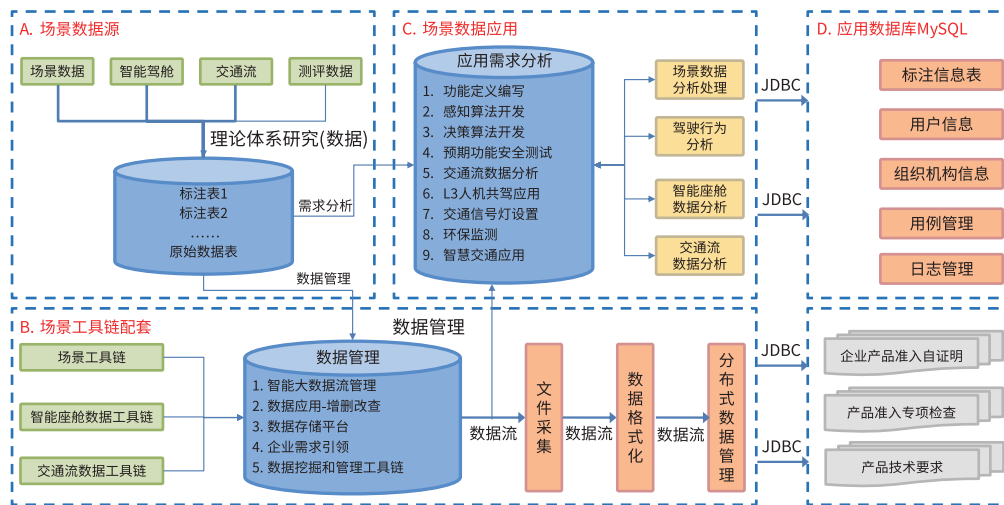
4.3.1 中汽数据有限公司 - 场景案例库

中汽数据有限公司已初步建成覆盖自然驾驶及标准法规的仿真测试场景库。在自然驾驶仿真场景方面，截止 2018 年底，中汽数据有限公司已采集超过 32 万公里自然驾驶里程数据，地域覆盖北京、天津、上海等重点城市，工况覆盖高速、城市、乡村、停车场等重点领域，环境覆盖晴天、雨天、雪天、雾霾等多种天气，范围覆盖典型场景、边角场景、事故场景等多种类型。

在标准法规仿真场景方面，中汽数据已基于 ISO、NHTSA、ENCAP、CNCAP 等多项标准、评价规程构建了 20 余种标准仿真测试场景，支持 AEB、ACC、LKA、APA 等多种自动驾驶功能的仿真实验验证，同时贯通了标准场景的自动化测试流程。基于涵盖多线激光雷达、带融合算法的固态激光雷达、毫米波雷达、视觉感知传感器和 GPS 惯导系统的高精度场景数据采集平台，采集积累了国内数据量最大的场景数据，采集范围涵盖全国大部分地区、各种道路类型。通过场景数据的分类、标注、统计分析和重构等理论方法及数据处理，建设形成了全国范围覆盖 26 种自动驾驶功能的场景库。中汽数据基于多年的标准制定、国际合作和企业项目经验，建设了一整套场景数据采集、场景分类、数据标注、统计分析、场景重构、大数据管理体系，并开发了国内一套较为成熟的场景工具链。中汽数据结合多源异构的驾驶场景大数据，涵盖实车采集的全国多个省市高速公路、城市、乡村、停车场等驾驶场景，来支撑自动驾驶汽车的仿真开发与测试工作。同时，作为 C-ASAM 工作组组长单位以及 OpenSCENARIO 1.x 项目全球

负责人，当前采集体系及相应场景数据均按照 OSC 格式数据及相应地图数据，完成全面的体系建设，形成一套由采集数据至仿真数据的完整场景体系。

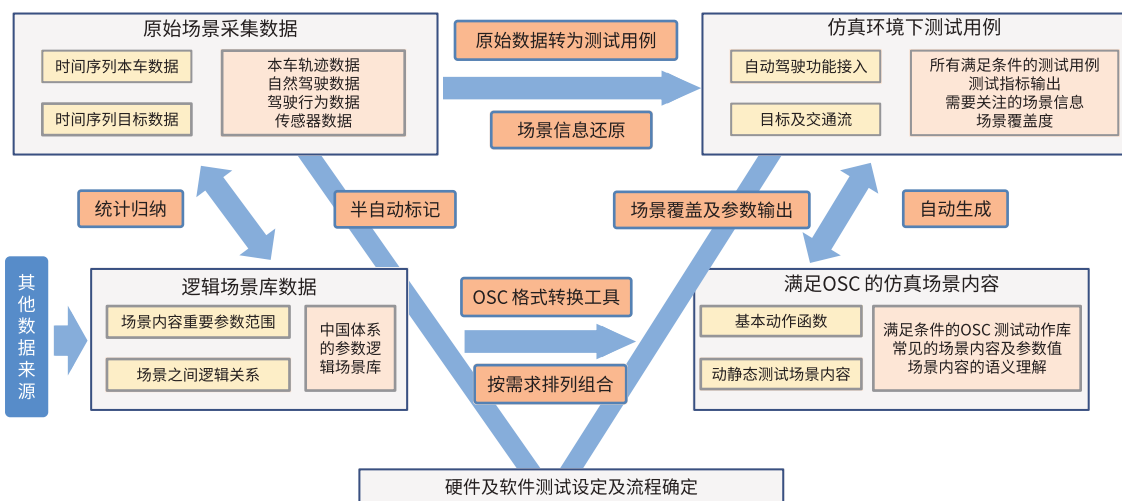
图表 19 中汽数据有限公司场景数据库体系



资料来源：中汽数据有限公司，课题组整理

基于以上数据来源，中汽数据结合多源异构的驾驶场景大数据，涵盖实车采集的全国多个省市高速公路、城市、乡村、停车场等驾驶场景，来支撑自动驾驶汽车的仿真开发与测试工作。目前，中汽数据具备自主化的仿真云平台软件工具、全流程的 X-In-The-Loop 在环仿真平台集成技术及百万量级的高级别自动驾驶仿真场景库，以数据为核心的数据软件化、软件知识化、知识平台化，构建完整的从数据到仿真应用工具链。

图表 20 中汽数据有限公司数据库与仿真数据生成体系



资料来源：中汽数据有限公司，课题组整理

4.3.2 中国汽车工程研究院股份有限公司 - “中国典型场景库 V2.0”

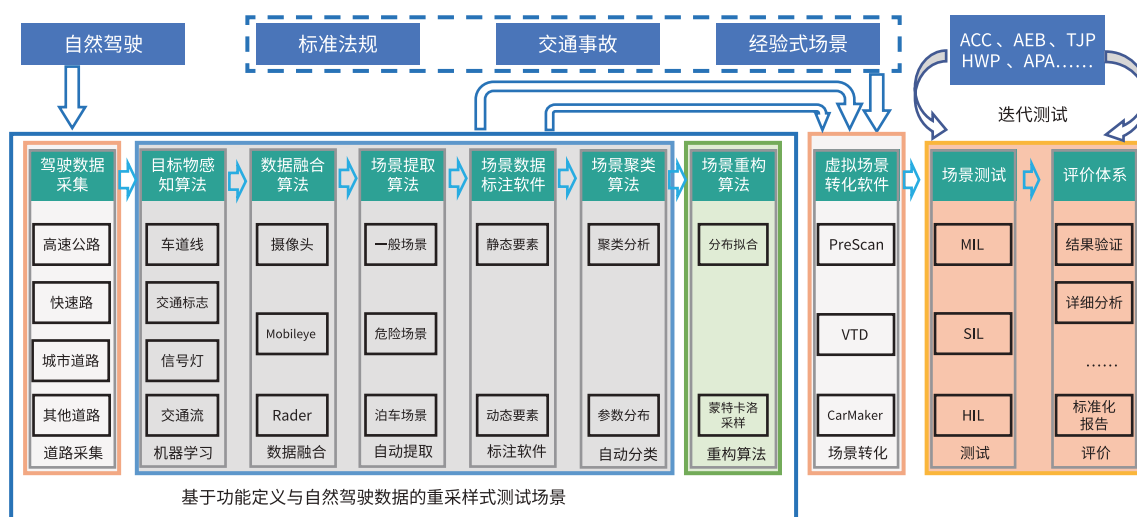
2019 年 10 月 11 日，中国汽车工程研究院股份有限公司（以下简称“中国汽研”）发布了“中国典型场景库 V2.0”。“中国典型场景库 V2.0”，包括数百例标准法规场景、3000 例经验式场景、5 万例功能场景、150 例事故

场景，同时附有详细的场景库构建方法技术文档，目前对外免费公开 30 例场景文件。

“中国典型场景库 V2.0”是参考德国 PEGASUS 项目的场景分类体系及 ASAM 推出的 OpenDRIVE 和 OpenSCENARIO 仿真格式，构建的具备中国驾驶场景特征的虚拟仿真场景。“中国典型场景库 V2.0”总体方案，包括场景数据采集、场景分类提取、场景统计分析、虚拟场景转换生成等，可应用于 MIL、SIL、HIL 等虚拟仿真系统的测试。

“中国典型场景库 V2.0”数据来源主要包括标准法规、交通事故、人工经验以及自然驾驶数据四大数据源，与中汽数据有限公司的场景库划分标准总体类似，但是中国汽研的人工经验数据与中汽数据有限公司的参数重组测试场景有所区别。

图表 21 “中国典型驾驶场景库 V2.0”总体方案



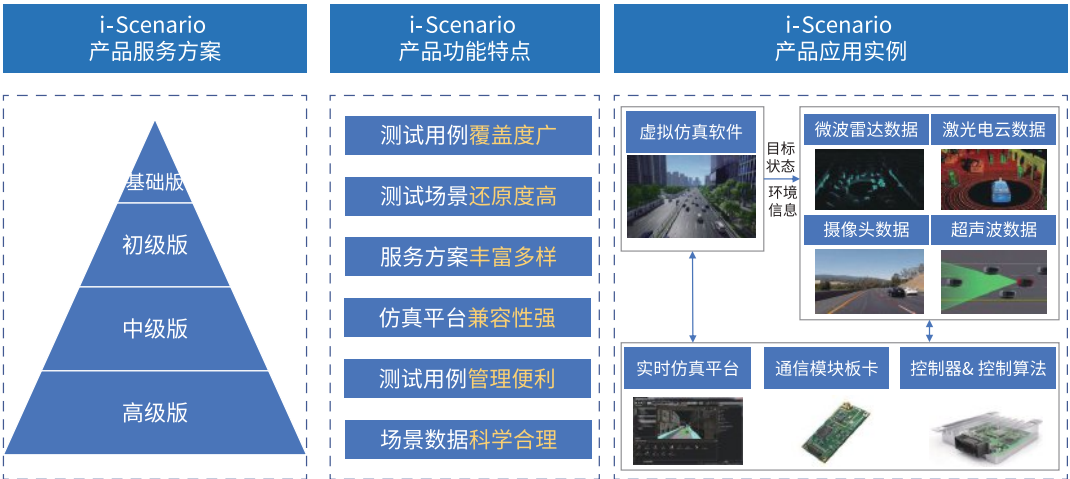
资料来源：中国汽车工程研究院股份有限公司，课题组整理

“中国典型场景库 V2.0”四大数据源介绍：

- ◆标准法规场景全面覆盖五大 ADAS 及部分 L3 级自动驾驶功能的标准法规，包括：GB/T 26773-2011、GB/T 33577-2017、GB/T 33577-2017、GB/T 20608、JT/T 1242-2019、JT/T 883-2014、ISO 15623-2013、ISO 15622、ISO 17361、ECE R130、ECE131、Euro-NCAP、C-IASI、i-VISTA 等。
- ◆经验式场景主要依靠中国汽研雄厚的 ADAS 实测经验及数据，总结 ADAS 实测失效场景，并基于测试专家经验人工添加特殊场景，形成针对各项 ADAS 及自动驾驶功能的虚拟测试场景。
- ◆交通事故场景通过对中国宏观交通事故数据分析以及深入事故调查数据分析，提出符合中国事故的分类。基于事故数据统计得到各类事故类型、发生频率、伤亡情况、道路交通情况等比例信息，选取等比例事故，进行深入事故再现，提取车辆运动状态、运动轨迹、道路环境等信息，以 GIDAS/XML 等格式存储，形成事故场景库，应用于自动驾驶功能的虚拟仿真测试。
- ◆自然驾驶场景的建立是通过大规模中国道路自然驾驶数据的采集，提取各类型典型场景，进行场景参数标注及统计分析，形成逻辑场景。而后基于逻辑场景的参数分布，大规模生成具体场景参数，并以通用场景格式存储，形成数万级的虚拟场景文件。

2019 年 11 月 25 日，在第四届 i-VISTA 智能网联汽车国际研讨会上，中国汽研发布了中国驾驶场景特征的虚拟仿真场景库（i-Scenario）。该场景库可适配主流虚拟仿真平台，解决了不同平台虚拟场景兼容问题。

图表 22 中国汽研虚拟仿真场景库 i-Scenario 产品介绍



资料来源：中国汽车工程研究院股份有限公司，课题组整理

4.3.3 腾讯 TAD Sim 场景库

TAD Sim 根据自动驾驶测试需要，提供结构化 \ 非结构化、静态 \ 动态、危险、极限、复杂场景集，并考虑中国特有的典型交通场景和国内法规标准要求，提供算法功能和性能的测试场景。自 2018 年以来，腾讯自动驾驶已经积累了超过 50 万公里交通场景数据。

TAD Sim 数据集涵盖车辆避撞能力、交通合规性、行为能力、视距影响下交叉路口车辆冲突避免、碰撞预警、紧急制动、危险变道、无信号交叉口通行、行人横穿等方面。目前场景库包括 1000 种场景类型，可以泛化生成万倍以上规模的丰富场景。

图表 23 腾讯 TAD Sim 场景库

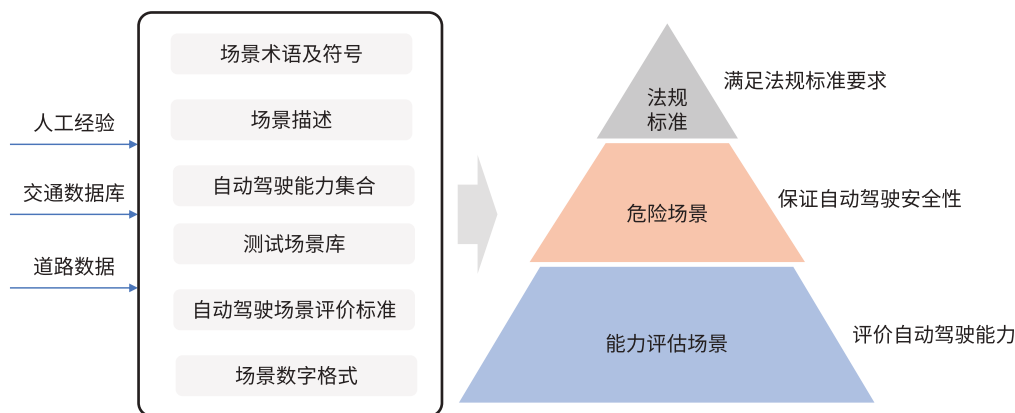
场景类型	城市道路、山区道路、高速公路、园区
道路类型	直道、弯道、坡道、丁字路、十字路、Y 型路、环岛、双向多车道、急转、道路变窄 / 变宽、驼峰桥、低洼不平、隧道、桥梁等
要素分类	行人、车辆、交通流、道路、基础设施、障碍物、天气
车道	单向车道、双向车道、三车道、四车道等；
车道线类别	黄白色实线、黄白色虚线、双黄白实线、双黄白虚线、黄白色虚实线、无车道线；
路面	干燥、潮湿、摩擦系数、车道数、路宽、车道线、曲直、纹理
天气环境	晴天、黑夜、阴天、雨天、雪天
动态要素	非机动车、动物、车道指示灯、人行、交通灯、路灯、行人、交通车
静态要素	建筑、树木、沙堆、路面标识、防护栏、路缘石、收费站 / 检查站、隧道、桥、龙门架等

资料来源：腾讯，课题组整理

4.3.4 百度 Apollo 场景库

百度测试场景库包含典型的日常行驶场景、高碰撞风险场景、法律法规场景等，同时也包含已经形成行业标准的场景。目前百度测试场景库已累积数百万个场景，而且仍不断在增长。运行一轮测试场景库，相当于百万公里的实际道路测试。

图表 24 百度 Apollo 场景库构成



资料来源：量子位，课题组整理

百度 Apollo 仿真场景分为 Logsim 和 Worldsim。Logsim 是由路测数据提取的场景，提供复杂多变的障碍物行为和交通状况，使场景充满不确定性。Worldsim 是基于路测数据自动化场景挖掘手段进行逆向补充，由人为预设的障碍物行为和交通灯状态构成的场景，可简单高效的测试自动驾驶车辆。随着道路测试数据的积累，Worldsim 场景库的覆盖度将变得越来越高。

百度 Apollo 目前提供约 200 个场景，包括：

- ◆基于不同的路型，包括十字路口、调头、直行、三叉路口、弯道；
- ◆基于不同的障碍物类型，包括行人、机动车、非机动车及其他；
- ◆基于不同的道路规划，包括直行、调头、变道、左转、右转、并道；
- ◆基于不同的红绿灯信号，包括红灯、黄灯、绿灯。

4.4 共建自动驾驶场景库

场景库建设处于各自为战的状态。目前在自动驾驶仿真场景库建设方面，企业都投入大量资金与人才建立自己的场景库。由于厂商之间缺乏有效合作，场景数据格式不一致，很难形成全国统一的场景库。场景库不统一也导致了自动驾驶仿真测试评价、认证体系很难建立，阻碍了我国自动驾驶汽车的发展。

考虑到上述困境，如果能采用统一数据格式标准，不同厂商共同建设场景库，形成通用的、可移植的场景库是理想的选择。由于国内尚无统一的场景库格式标准，各大科技巨头虽有能力建设场景库，但出于保护自身核心场景库技术，不愿投入精力共同建设场景库。而场景库数据格式标准不统一是共建场景库最大的障碍，其背后的主要原因包括：

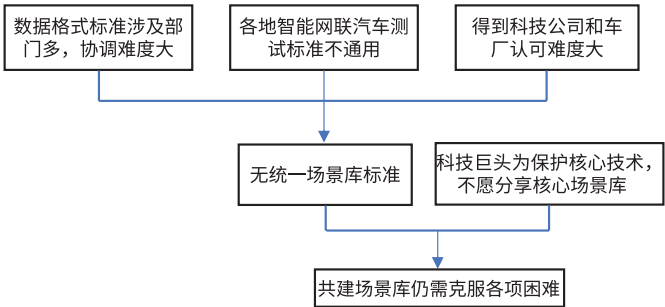
第一，场景库数据格式标准制定涉及工信部、公安部、交通部，缺乏标准牵头制定单位，各部委关于数据格式的定义及适用范围管辖范围不一致，而且缺乏有效协调机制，导致标准制定落后于市场进展。

第二，由于国家尚未出台统一的智能网联汽车测试基地技术认定标准以及汽车测试评价标准，各地智能网联汽车测试基地具有不同的场地设施、不同场景、不同检测流程和办法、不同测试能力，导致各测试基地测试标准和测

试结果不能互认共享。

第三，车厂在传统动力学仿真方面习惯使用传统仿真软件，科技公司在仿真软件研发方面主要依赖自主创新，仿真软件应用基础及习惯的不同导致目前在场景库数据格式标准制定方面要得到科技公司和车厂的一致认可难度较大。

图表 25 国内共建自动驾驶仿真测试场景库仍需克服各项困难



资料来源：课题组整理



第五章

自动驾驶测试评价体系

现实世界的汽车在驾驶过程中会遇到各种驾驶情景，人类经过不断学习与积累，可以很快掌握应对不同驾驶情景的能力，验证人类是否具备这种能力的方法是驾照考试。同样，自动驾驶汽车商用前也需要通过一系列方法评价其“驾驶能力”，如驾驶安全性及舒适性、驾驶协调性等。由于时间和成本的限制，自动驾驶车辆无法进行充分的道路测试，因此当前普遍共识是基于虚拟仿真的测试评价，充分验证自动驾驶汽车在自然驾驶场景、标准法规测试场景、危险工况场景、参数重组场景下的表现。利用仿真环境的真实性、可复现性、交互性、无限性、自动化等特点，自动驾驶系统可以得到客观的测试评价。

『 5.1 自动驾驶测试评价方法 』

目前自动驾驶测试主要在虚拟仿真软件进行，因此仿真测试的评价应包括仿真测试自身评价以及自动驾驶车辆驾驶性能、驾驶协调性、标准匹配性、学习进化性等方面。在仿真真实度及仿真效率方面，通过游戏技术来打造更真实的测试场景，使用云计算的能力提升测试效率已经成为业界的公认方向。

图表 26 自动驾驶测试评价体系



资料来源：公开资料，课题组整理

仿真测试本身性能是自动驾驶测试评价的基础。基于场景的虚拟仿真是目前自动驾驶仿真的主要路线，因此场景覆盖率、场景真实度是仿真测试的核心，只有全面覆盖自然驾驶场景、标准法规场景、危险工况场景及参数重组场景，才能真正验证自动驾驶车辆的性能表现。真实性是评价虚拟场景与现实世界场景的仿真还原度、是实现高精度传感器仿真的基础。仿真效率体现的是虚拟车辆在仿真平台每日仿真里程数及重点场景的覆盖率，如极端、危险场景等，以及云平台带来的加速仿真和高并发仿真优势，仿真效率是验证自动驾驶系统安全性的最关键指标。云仿真体现的是众多自动驾驶车辆互相之间以及自动驾驶汽车与城市不同道路、设施、不同环境的交互，是提升自动驾驶车辆应对复杂城市环境的最终考验。

驾驶性能是评价自动驾驶车辆的核心。驾驶性能体现了自动驾驶车辆的安全性、高效性、舒适性，其中最核心的是安全性。安全性又可分为自动驾驶模块和自动驾驶基础功能。自动驾驶模块指汽车自身硬件和软件的安全性，

自动驾驶基础功能是汽车面对复杂交通和环境时的应对能力。由于自动驾驶汽车可能会遇到预期内或预期外的驾驶情景，驾驶的安全是目前自动驾驶仿真关注的重点。驾驶高效性指自动驾驶汽车从始发地出发前往目的地的路径规划能力，体现为到达目的地的准点率。驾驶舒适性主要考虑行驶过程中汽车平顺性、驾驶员体感判定及心理感受，平顺性体现汽车油门、刹车及转向过程中的驾乘平稳性，体感判定是通过驾驶员在环判断汽车横摆角、顿挫感等，心理感受包括心理安全感及迟钝感主观感受等。

交通协调性是评价自动驾驶车辆与外部环境交互的结果。由于自动驾驶车辆在行驶过程中会和其他机动车（有可能是自动驾驶车辆）、非机动车、行人等其他交通参与者进行交互，通过判断其他交通参与者的意图而做出规划和决策。人类驾驶员可以很快判断其他交通参与者的行为做出驾驶决策，但自动驾驶汽车目前主要是通过感知周边环境做出保守型决策，最终目的是保证车辆的安全性，但从整个交通参与者或全局视角评价，自动驾驶汽车的决策不一定是合理的。例如人类驾驶员发现前方车辆行驶较慢，而左侧车道无车时，一般会选择变道超车。而如果是自动驾驶汽车出于安全考虑，会选择一直保持安全车距跟车行驶，从而会影响后面车辆的行驶效率。综合评价，从安全性和舒适性方面看，自动驾驶汽车的决策是合理的，但是从交通协调性方面看，并不是最佳选择。目前，在仿真平台内，对交通协调性表现的合理与否是很难进行评价的，只能从外部交通参与者或全局角度进行评价。未来，随着机器学习技术的进步，以及车路协同体系的建立，自动驾驶汽车的交通协调性将表现更好，评价更方便。

标准匹配性是评价自动驾驶车辆在标准测试场景下的表现。目前国内外已形成了比较完善的 ADAS 功能测试标准和方法，如 ACC、AEB、FCW、LDW、LKA、BSD 等，功能测试标准的建立使得自动驾驶有了可依据的评价标准，使评价体系更加规范。

图表 27 ADAS 已形成的测试功能及标准来源

功能	标准来源	发布年份
ACC	GB	2006
	ISO	2010
	SAE	2014
AEB	IIHS	2013
	JNCAP	2014
	NTHSA	2015
	Euro NCAP	2015
	ANCAP	2017
	CNCAP	2018
FCW	SAE	2003
	ISO	2013
	NTHSA	2013
	ANCAP	2017
	Euro NCAP	2017
	GB	2017
	CNCAP	2018
LDW	GB	2011
	NTHSA	2013
	JNCAP	2014
	ISO	2017
	ANCAP	2017
	Euro NCAP	2017
LKA	NTHSA	2013
	ISO	2014
	ANCAP	2017
	Euro NCAP	2017
BSD	ISO	2008
	NTHSA	2014

资料来源：公开资料，课题组整理

学习进化性是检验自动驾驶汽车智能化的标准。自动驾驶车辆在行驶过程中遇到障碍物时会刹车，但是如果通过机器学习，准确识别障碍物以后，在确认安全性的前提下就不会再次急刹车，而是会直接通过或者避让，这是自动驾驶车辆通过重现障碍物学习获得的知识。在场景识别方面，我们知道由于场景库改变某些参数的条件下，可以生产无限的连续性场景，而自动驾驶车辆要测试每一个场景是很难实现的，因此通过泛化迁移能力对场景进行归类学习，可以简化自动驾驶系统的学习难度，加快自动驾驶汽车的研发进度。

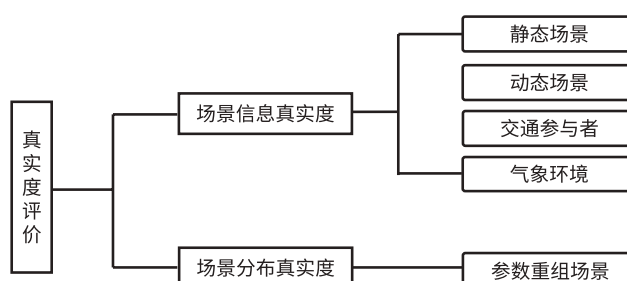
『 5.2 仿真测试的真实性与有效性评价 』

在自动驾驶测试评价体系中，仿真测试的评价是最基础的，只有满足一定条件的仿真测试才能实现促进自动驾驶汽车的落地。仿真测试最核心的是真实性和有效性，通过对比自动驾驶汽车在虚拟世界和真实世界的表现，综合评价仿真测试结果。

5.2.1 真实性评价

仿真测试真实性评价针对场景信息真实度、场景分布真实度两个方面，主要是为了验证场景库的真实合理性，为自动驾驶车辆测试提供最接近真实世界的虚拟场景。

图表 28 仿真测试真实性评价体系



资料来源：公开资料，课题组整理

场景信息真实度主要包括场景构成中的静态环境、动态环境、交通参与者、气象环境等要素。场景在建立过程中，需要准确地虚拟环境中渲染道路交通标线，道路交通标志，各种道路的立体、平面结构，路面材质，路段性质等静态环境信息；交通信号灯颜色变化，可变交通标志，交通警察等动态环境要素；机动车，非机动车，步行行人，残疾人，动物等交通参与者；光线强度，光线角度，雨、雪、雾、霾天气等气象要素。

场景分布真实度主要针对参数重组场景中由特征元素组合和人工编辑合成的场景。不同于自然驾驶场景、危险工况场景、标准法规场景等自然存在或合理设置的场景，参数重组场景中由于人工修改参数后的场景可能在真实世界不存在，如果再进行测试就会导致测试资源被浪费，降低测试进度。因此，人工编辑场景时需考虑真实世界场景的参数值范围，参数范围可以选择用概率分布来确定，适当考虑极端情况，合理化设置参数重组场景。

5.2.2 有效性评价

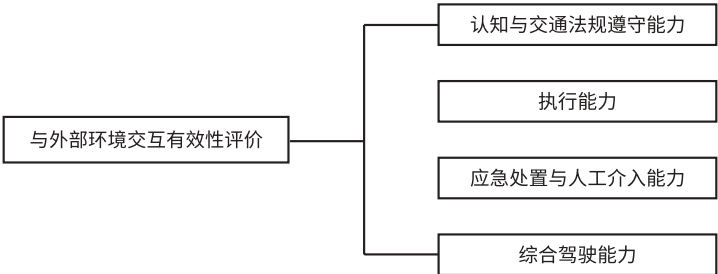
仿真测试的有效性评价在于验证仿真测试的结果准确性。

仿真测试的一个局限在于仿真测试的精确度有限。因此，验证仿真测试的目的是验证仿真工具链的准确性。为了保证仿真测试结果的有效性，需要对仿真测试工具链提出要求。联合国 WP.29 GRVA 自动驾驶工作组 VMAD 自动驾驶安全验证方法子工作组在它的主文件《New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM) Master

Document》中提出了一种验证仿真测试有效性的方法：对比自动驾驶系统在仿真测试与实车测试中的性能差异。考虑到实车测试在场景上与仿真测试相比，有较大的局限性，仿真测试的有效性验证只能在关键的部分场景中进行验证。

在场景测试标准方面尚无正式的国家标准规范，参照中关村智通智能交通产业联盟发布的《自动驾驶车辆道路测试能力评估内容与方法》（T/CMAx 116-01—2018）团体标准，可以实现自动驾驶车辆在常规场景的有效性评价。团体标准包括认知与交通法规遵守能力、执行能力、应急处置与人工介入能力、综合驾驶能力等四个大项，基本覆盖了自动驾驶车辆与场景外部环境中的静态场景、动态场景、交通参与者、气象等所有要素的交互。每个大项又分为数个专项，专项又分为具体的测试评价场景，基本覆盖了汽车日常驾驶场景，使自动驾驶仿真测试具备有效性评价的依据。

图表 29 仿真测试与外部环境交互有效性评价体系



资料来源：《自动驾驶车辆道路测试能力评估内容与方法》（T/CMAx 116-01—2018），课题组整理

图表 30 仿真测试外部环境交互性评价场景举例

大项	专项	测试评价场景
认知与交通法规遵守能力	交通标志	限速标志识别及响应
		减速让行标志识别及响应
		停车让行标志识别及响应
		潮汐车道标志识别及响应
		禁止通行标志识别及响应
	交通标线	车道线识别及响应
		人行横道线识别及响应
		停止线识别及响应
		潮汐车道标线识别及响应
		网状线识别及响应
	交通信号灯	机动车信号灯识别及响应
		闪光警告信号灯识别及响应
		方向指示信号灯识别及响应
		车道信号灯识别及响应
		信号灯故障识别及响应
	交通指挥手势	移动式交通信号灯识别及响应
		停止信号手势识别及响应
		直行信号手势识别及响应
		右转弯信号手势识别及响应
		左转弯信号手势识别及响应

执行能力	曲线行驶	曲线行驶
	直角弯道行驶	直角弯道行驶
	双凸路行驶	双凸路行驶
	限宽路段行驶	限宽路段行驶
	窄路掉头	窄路掉头
	坡道停车和起步	坡道停车和起步
应急处置与人工介入能力	紧急情况处置	车辆或系统故障
		系统无法处置的场景
		自动紧急避让
	人工介入后的可操作性	制动踏板介入
		方向盘介入
		硬或软开关介入
综合驾驶能力	紧急停车	紧急停车
	起步	路侧停车起步
		左侧行人通行起步
		左侧非机动车通行起步
		左侧车辆通行起步
		车门未完全关闭起步
		前方障碍物起步
	跟车	稳定跟车
		下坡 - 上坡路跟车
		上坡 - 下坡路跟车
		弯道内跟车
		跟车时前车切出
		跟车时邻车道车辆切入
		停 - 走功能
	变更车道	避让障碍物变道
		避让静止车辆变道
		避让故障车辆变道
		避让事故车辆变道
		避让低速行驶车辆变道
		避让施工路段变道
		临近车道有车变道
		前方车道减少变道
	直行通过路口	无信号灯路口行人冲突通行
		无信号灯路口非机动车冲突通行
		无信号灯路口车辆冲突通行
		路口车辆冲突通行
		拥堵路口通行
	通过人行横道线	单一行人通行
		群体行人通行
		单一非机动车通行
		群体非机动车通行
		行人和非机动车通行
		行人折返通行
		行人违章通行
		非机动车违章通行
	路口左转弯	路口行人冲突通行
		路口非机动车冲突通行
		路口车辆冲突通行
	路口右转弯	路口行人冲突通行
		路口非机动车冲突通行
		路口车辆冲突通行

综合驾驶能力	路口掉头	路口掉头
		直行车辆冲突通行
	靠边停车	靠路边应急停车
		最右车道内靠边停车
		路边行人站立
		路边行人通行
		路边非机动车静止
		路边非机动车通行
	通过公共汽车站	通过公共汽车站
		公交车前部行人穿行
	会车	对向车辆借道通行会车
		下坡 - 上坡路会车
		上坡 - 下坡路会车
		无交通标线道路会车
	通过环岛	环岛绕行
		入环岛时绕环岛车辆通行
		绕环岛时出环岛车辆通行
	主辅路行驶	入辅路时车辆冲突通行
		出辅路时车辆冲突通行
	通过模拟苜蓿叶式立交	通过模拟苜蓿叶式立交
	通过学校区域	学校区域通行
		儿童穿行
	通过隧道	通过隧道
		隧道内行人违章通行
		隧道内行人沿道路行走
		隧道内施工路段绕行
	超车	超车
		超车过程中前车变道
	停车入库	停车入库
		库内放置障碍物
	侧方停车	侧方停车
		停车位内地锁撑起
	通过雨区道路	通过雨区道路
		雨区行人冲突通行
		雨区非机动车冲突通行
		雨区机动车冲突通行
	通过雾区道路	通过雾区道路
		雾区行人冲突通行
		雾区非机动车冲突通行
		雾区机动车冲突通行
	通过湿滑路面	通过湿滑路面
		湿滑路面行人冲突通行
		湿滑路面非机动车冲突通行
		湿滑路面机动车冲突通行
	通过遗撒路面	通过遗撒路面
	避让应急车辆	避让应急车辆
	夜间行驶	夜间行驶
	可变导向车道	潮汐车道行驶
		可变导向车道行驶
	待转区	路口左转待转区通行

资料来源：《自动驾驶车辆道路测试能力评估内容与方法》（T/CMAA 116-01—2018），课题组整理

『 5.3 仿真测试与道路测试的闭环验证 』

在自动驾驶汽车商用之前,必须经历仿真测试、封闭场地测试、道路测试三个阶段,每个阶段的侧向目的各有不同。

(1) 仿真测试阶段主要是为了验证自动驾驶汽车性能及安全,具体包括:

- ◆针对自动驾驶汽车开发验证、测试评价、检测认证等各个流程的审查评估;
- ◆自动驾驶安全性管理体系评估;
- ◆仿真结果到道路测试的应用。

(2) 封闭场地测试主要是为了开展功能及性能评估,具体包括:

- ◆开展功能及性能评估测试(危险工况场景、自然状态下出现概率低及难以复现的场景);
- ◆试验精度可控,最大程度保证自动驾驶系统的真实性能,用于验证仿真测试和道路测试的准确性。

(3) 道路测试主要是为了综合评估及考核认证自动驾驶车辆,为商用做准备,具体包括:

- ◆公开道路车辆行为综合评估;
- ◆评估自动驾驶系统应对真实交通状况的能力;
- ◆自动驾驶系统上路前的考核认证;
- ◆随机覆盖日常驾驶典型场景,防范系统漏洞;
- ◆仿真测试、封闭场地测试、道路测试三者之间互相补充,形成测试闭环,共同促进自动驾驶车辆的研发和标准体系建立。

道路测试可以为仿真测试提供场景搭建基础素材,危险场景由仿真测试代替道路测试完成。仿真测试场景需结合道路测试场景要素,参数化处理,进行人工编辑,不断构建道路测试难以复现的新场景,逐步完善场景库。复杂天气、复杂交通、事故场景等危险工况场景由于复现性低、危险性大,难以在道路测试中进行,但在仿真测试中可以进行无限次测试,保障了测试安全。

仿真测试可以补充道路测试,加快自动驾驶车辆测试速度。在公开道路测试中自动驾驶汽车表现欠佳的场景,需通过仿真测试不断训练学习,强化自动驾驶算法,提升车辆应对各种场景的能力。此外,由于道路测试绝大部分驾驶时间属于安全的自然驾驶情景,如果要测试完所有场景,耗费时间长,仿真软件不仅可以实现高并发测试,而且可以加快测试速度,可节省大量时间。



第六章

中国自动驾驶仿真测试展望

『 6.1 自动驾驶仿真测试面临挑战 』

目前自动驾驶仿真测试已初步形成完整的产业链体系，形成了科技公司、自动驾驶解决方案商、仿真软件企业为主的上游仿真软件提供商，以车企、自动驾驶测试机构为主的仿真软件下游应用商。从产业链角度分析，目前自动驾驶仿真测试还存在诸多问题。

6.1.1 仿真场景库建设与合作机制有待完善

场景库建设效率低、费用高。目前场景库建设还需要依靠大量人工进行采集、标注，然后进行场景分析挖掘、测试验证，整个流程效率低、成本高，目前全球每年人工标注成本在 10 亿美元量级。数据采集阶段需要采集车辆位置信息、静态信息、动态信息、交通参与者信息、气象信息等，主要采集方法是通过采集车安装传感器进行实车采集，步骤比较繁琐。场景分析挖掘阶段需要对上一阶段采集的数据经过场景理解、特征提取、数据挖掘、统一格式以及关联数据、标签化处理之后应用于测试层。现有场景库建设大量依赖人工，亟需自动化的采集、分析提取、标签生成的场景构建方法。

场景库规模不够大，多样性、覆盖性、可扩展性不强。现有场景库不足以覆盖常见交通场景，在有限的资源投入情况下，还不能有效表征真实世界的多样性。由于场景中不同要素的改变均可以扩展为不同的场景，目前场景扩展性还不足以满足仿真测试的要求。

场景有效性有待提高。现有场景是按实时数据采集，无法满足自动驾驶场景动态变化的要求。在场景中，人、车、路、行驶环境等动态和静态要素耦合，一个要素的变化将引起其他要素的改变，而且不同交通参与者均有自己的行为逻辑。例如改变车辆行为和轨迹，周边车辆和行人的行为也将随之改变。

场景数据的采集格式和存储问题。现有的测试场景采集，是基于不同的车辆和传感器配置，无法适用于各类车型及技术路线的研发与测试，高精度地图的格式也是行业关注的重点。场景库的数据格式如系统架构、数据接口、数据库管理系统等统一也是需要重点关注的问题。

测试场景中的测试真值及评估体系。测试场景数据采集需考虑采集要求、采集方法、数据预处理、数据传输存储、采集数量、采集精度、时间同步性、采集范围、采集完整性等各方面的因素，任何一个因素的欠缺都将导致场景的真实性及有效性。而且针对不同场景下自动驾驶测试车辆的测评指标体系尚不完善。

场景库建立缺乏合作，资源重复性投入大。目前单一企业很难完成覆盖所有场景的场景库建设。当下各企业场景库建设都是各自为战，导致资源重复性投入，企业之间缺乏场景库建设合作。尤其是自然驾驶场景、标准法规场景等共性场景可以通过合作共建，实现使用共享，目前这方面的合作还很少。

6.1.2 自动驾驶仿真测试评价体系缺乏规范

在自动驾驶仿真测试方面，由于不同仿真软件系统架构及场景库构建方法的不同，导致很难建立统一规范的仿真测试评价体系。目前国内仿真评价体系的研究方向主要是从驾驶安全性、舒适性、交通协调性、标准匹配性等方面评价自动驾驶车辆仿真测试结果，对于仿真软件自身的评价缺乏统一的评价标准，如仿真软件场景真实度、场景覆盖度、仿真效率等。

自动驾驶汽车作为智能化产品，未来需要应用深度学习算法使汽车具备自我学习能力，如道路障碍物的复述重现能力、场景的泛化迁移能力，因此自我学习进化性也是自动驾驶汽车的评价指标，目前自动驾驶汽车的学习进化性还缺乏相应的评价规范。

『 6.2 自动驾驶仿真测试发展建议 』

自动驾驶仿真测试在自动驾驶研发过程中将发挥越来越重要的作用，从模型到软件，从软件到硬件，从部件到系统，各层次都需要不断深入的构建自动驾驶仿真模型，组成完整的仿真技术体系，逐步推动自动驾驶技术早日实现商业化。而测试场景库作为自动驾驶仿真的基础，是仿真建设的核心内容。针对目前场景库领域面临的问题，建议加强以下方面的工作。

第一，将仿真技术应用于交通行为管理和监督。在虚拟仿真世界中，机动车、非机动车、步行行人、残疾人、动物等交通参与者均可以模拟现实世界的逻辑运行，根据不同交通参与者的行为逻辑关系可以界定各个实体的行为合法性。在现实世界中，如果道路发生交通事故，可以通过仿真软件评估交通事故的法律责任，帮助对交通行为进行管理和监管，对交通规则进行技术评估和升级。

第二，建立全国范围的基础场景库，同时鼓励发展个性化场景库。基础测试场景库包含常规的测试场景鼓励进行分享共建，可以减少资源的重复性投入，加快自动驾驶仿真测试进程。由科技公司、车企、自动驾驶解决方案提供商、高校及科研机构平均分摊基础场景库建设资金，采用统一的标准格式，存储在公有云平台。基础场景库各部分由原建设单位负责运营管理，并同步实施更新。基础场景库建设单位免费使用场景库，外部单位使用需收费，收入由建设单位平均分配。个性化场景库包括极端场景、危险工况场景等，属于企业核心技术予以保护，允许不统一，但需搭建和标准格式之间的转换机制。通过场景共享数据库帮助行业进行跨地区的交叉认可，最终达到自动驾驶系统的技术普适性。

第三，探索自动驾驶汽车与智慧交通、智慧城市有机融合的仿真技术。目前的仿真软件中道路标志、标线、道路设施是作为静态环境要素存在的。随着车联网技术的发展，车路协同有望成为未来发展趋势，道路感知、通信等基础设施将参与到自动驾驶车辆的驾驶行为交互中，在城市智能基础设施作用下车辆行为的仿真将对技术提出新的要求，指导智能基础设施的建设。未来随着智慧交通、智慧城市的建设，更大层面的智能交通将成为发展趋势，如智能交通管理、智能停车、智能公交、智能枢纽等，而仿真技术在虚拟环境中模拟智能交通运行，为智能交通系统查漏补缺，极大促进智慧城市的发展。

第四，建立仿真测试、认证、审查机制。在虚拟仿真世界，自动驾驶车辆是在按法律法规规定的算法环境中运行，可以率先进行模拟，尝试各种模拟的优劣性，给真实世界提供参考。仿真世界还可以更加全面、客观评价汽车各项性能、验证汽车安全性和可靠性、审查汽车合规性，为自动驾驶汽车提供一个科学的产品测试、认证和审查方法。

第五，鼓励混行交通、人机交互等方面仿真测试研究。自动驾驶汽车作为一个技术复杂的新兴产品，在真正达到技术成熟，具备商业化、规模化推广之前，自动驾驶替代传统汽车将是一个漫长的过程。这期间传统汽车与自动驾驶汽车混行的局面将长期共存，安全性问题将是重中之重，因此仿真软件需要能够实现仿真环境中自动驾驶车辆和传统驾驶员驾驶车辆的混行仿真。而且自动驾驶车辆驾驶逻辑和驾驶员驾驶行为之间的交互也是仿真应该重点关注的领域，以提升道路安全性。

第六，推动仿真技术的国产化。中国作为最大的汽车生产与消费国，核心技术的缺失必将导致国产汽车处于被

动局面。仿真软件作为自动驾驶汽车研发过程中最关键的核心技术之一，必须实现自主研发，才能不会因为被发达国家禁用而导致自动驾驶汽车产业停滞。目前，国产仿真软件相比国外仍比较落后，但国内车企、自动驾驶示范区有较大的市场需求。而且，中国的道路设计标准规范与道路行驶环境与国外相差较大，自主企业能更好地了解国内情况，研发出适合我国的自动驾驶仿真软件。因此，推动仿真软件国产化有助于我国自动驾驶测试、技术提升，实现仿真软件技术独立自主，实现中国智能汽车创新发展战略 2025 年目标。