

自动驾驶汽车测试方法综述

文/魏建龙 袁建华 王敏

0 引言

自动驾驶汽车搭载了先进的车载传感器、控制器、执行器等装置，融合现代通信与网络技术，具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能，从而实现安全、高效、舒适、节能行驶。自动驾驶汽车的系统复杂程度远远超过一般汽车，也不是各种ADAS的简单集合，其从最初的设计研制到最终的量产销售，必须通过一系列的验证和测试。根据兰德公司的数据，即使自动驾驶系统要比人类的驾驶能力提高20%，也需要110亿英里的验证。这就意味着在现实世界中，即使拥有100辆汽车的车队，也需要500多年时间一直不停地测试。此外，要真正验证自动驾驶系统的安全性和可靠性，还需要考虑很多极端场景，但对于现实世界来说，这是一个非常困难的事情。

如何对自动驾驶汽车开展测试并证明测试是否完整充分，是目前公认的难题，也是产业发展中急需解决的问题。目前对于自动驾驶汽车测试方法主要分为仿真测试和实车测试两大类。其中，仿真测试包含软件在环（Software In Loop, SIL）、硬件在环（Hardware In Loop, HIL）和车辆在环（Vehicle Hardware In Loop, VeHIL）；实车测试包含封闭场地测试和开放道路测试。各级测试对应的自动驾驶系统开发V模型如图1所示。

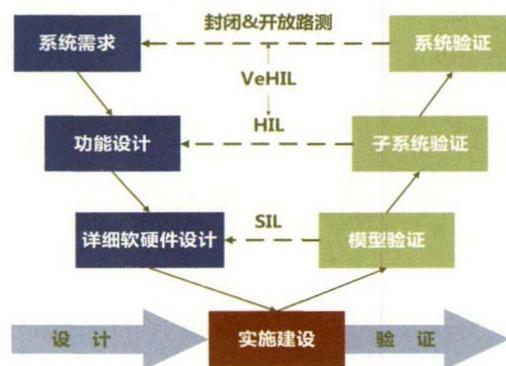


图1 自动驾驶开发V模型图

1 国内外自动驾驶测试开展情况

当前，美国、英国、欧洲、日本等发达国家及地区对智能网联技术的支持不仅仅局限于政策研究、技术开发等方面，更斥资建设智能网联汽车的测试或示范区，通过测试评价和示范应用解决智能网联汽车实际运营中的技术难题，推动自动驾驶与车联网的技术发展，引导产业标准规范的制定准则，抢占智能网联汽车行业优势地位。同时我国国家部委及地方政府对智能网联汽车产业的重视程度也不断上升，各地示范区建设步伐不断加快，以期能与现有汽车产业转型升级相结合。

2015年7月，全球首个自动驾驶封闭测试区M-City正式开园，引发了行业广泛关注，也推动了世界各国竞相开展自动驾驶测试场的建设。2016年11月，美国交通部(DOT)公布

“自动驾驶试验场试点计划”(Automation Proving Ground Pilot Program)，并于2017年1月19日确立了10家指定的自动驾驶试点试验场。

2016年11月，英国政府投1亿英镑用于提升互联与自动驾驶汽车测试基础设施建设。2017年3月30日，英国宣布启动第一阶段的投资竞标。该计划目标是沿伯明翰和伦敦之间的M40走廊建设网联与自动驾驶汽车先进技术集群，将基于英国现有的部分网联与自动驾驶汽车测试中心，在英国汽车产业核心区域（包括西米德兰兹郡的考文垂、伯明翰、米尔顿凯恩斯以及牛津和伦敦）集中建设

测试设施集群。

2016年2月12日,日本经济产业省制造产业局汽车课正式公布“无人驾驶评价据点整备项目”并面向社会征集承接单位,该项目落于茨城县筑波市的日本机动车研究所(JARI),从2016年开始正式建设,于2017年4月对外开放。

2017年2月8日,德国交通部在柏林宣布,德国和法国计划在两国之间的一段跨境公路上测试自动驾驶汽车。这一路段长约70公里,从德国西部萨尔兰州的梅尔齐希(Merzig)延伸至法国东部的梅斯(Metz)。两地之间相距约1小时车程,将用于“在真实的跨境交通中测试自动驾驶与网联汽车技术”。另外瑞典、新加坡、韩国都在进行自动驾驶测试环境的建设推进工作。

我国目前正在规划或建设的智能网联汽车测试及示范基地主要分为两类:一类是由国家相关部委联合地方政府批复,由相关企业或研究机构承担建设的封闭测试场地。目前主要以工信部、交通部为主,大约有10个,这类场地主要面向社会开放,承担测试及示范任务,主要包括:国家智能网联汽车(上海)试点示范区、5G车联网应用(浙江)示范区、国家智能汽车与智慧交通(京冀)示范区、智能汽车与智慧交通应用(重庆)示范区、国家智能网联汽车应用(北方)示范区、中国武汉智能网联汽车示范区、国家智能交通综合测试基地、长安大学车联网与智能汽车试验场、交通部公路交通综合试验场、重庆车辆检测研究院等;第二类是在地方政府的支持下,由高校、车企、研究机构自主建设的测试道路或示范区,主要包括长沙湘江新区智能网联测试区、中汽中心智能网联汽车试验中心建设项目、中国智能车综合技术研发与测试中心、奇瑞V2X示范场地、北汽无人驾驶体验项目、深圳无人驾驶示范区、雷诺自动驾驶示范区、德阳Dicity智能网联汽车测试与示范运营基地等。

2 仿真测试

要确保自动驾驶汽车的安全性和可靠性,理论上需要足量的道路测试,这在实际工作中极难实现,因此只有借助工程仿真,运用仿真技术才能够以较低的成本准确快速地对数以千计的驾驶场景和设计参数进

行虚拟测试。自动驾驶仿真测试,指通过传感器仿真、车辆动力学仿真、高级图形处理、交通流仿真、数字仿真、道路建模等技术模拟路测环境,并添加算法,搭建相对真实的驾驶场景,来完成自动驾驶汽车测试工作的一种形式。通常来说,自动驾驶汽车测试的仿真要经历软件在环仿真、硬件在环仿真和整车在环仿真。

2.1 场景构建

在仿真测试中,测试场景是开展仿真测试的基础,而测试场景架构的确定是测试场景的前提。

场景是指行驶场合和驾驶情景的组合,它受行驶环境的深刻影响,如道路、交通、天气、光照等因素,共同构成整个场景概念。场景是在一定时间和空间范围内环境与驾驶行为的综合反映,描述了道路、交通设施、气象条件、交通参与物等外部状态以及自车的驾驶任务和状态等信息。从场景架构来看,有不同的行驶场合,如高速公路、乡村道路、城市工况、机场、码头、封闭园区等;在不同场合下,如何驾驶、驾驶任务、驾驶速度、驾驶模式等一起构成了整个场景的三维架构。

自动驾驶汽车在测试评价内容和形式上与传统汽车的物理性能测试评价体系有明显不同,自动驾驶汽车测试重视评价整车多传感器的配合以及传感器融合输出的感知、判断和决策能力;自动驾驶汽车的测试场景需要具备多样化、典型性等特点,需要尽可能覆盖所有复杂的特殊场景;自动驾驶汽车测试的软件系统和硬件设备与传统汽车相比也变化巨大。

自动驾驶汽车上路行驶时要面临各种各样错综复杂的环境,测试体系不可能对其穷尽,因此可以按照一定的分类方法将各种测试场景进行分类划归:对象、路况、环境和行为。对象包括:物体类型、对象移动速度、对象移动方向、对象数量、环境意识等;路况包括:交叉口设计、交通管制方式、车道数量、车道线、车道类型、限速、道路类型、角度和区域等;环境包括:天气、光照、路面、信号和噪音等;行为包括:速度、加速度、信号等。

将以上不同类别的场景要素排列组合,构成一个完整的场景体系,称作场景库。例如跟车场景、人行横道线、对向来车、行人不遵守交规、障碍车辆逆行等。

一个场景库基本的构建流程是：首先以路侧数据、车载数据、虚拟数据三种来源输入、存储场景源；其次，要通过场景挖掘、场景分类、场景演绎等方式有层级、有规划地构建场景库；最后将场景库应用于场景测试环节，包括软件在环、硬件在环、整车在环、封闭道路、开放道路五种。

2.2 软件在环仿真

软件在环是指在系统代码级别进行功能测试，通过输入大量测试场景，可快速、高效地验证自动驾驶系统环境感知算法、决策控制算法等。SIL仿真测试最重要的目的是旨在通过PC验证代码是否实现功能需求。

SIL仿真测试可通过特定的控制软件设置车辆电子控制单元（ECU）的相关信号代替硬件在环仿真中的硬件，并将待测ECU代码信息集成配置为虚拟ECU，通过运行虚拟控制器中的I/O模型和系统环境中的车辆模型来模拟控制器所需的各种传感器信号，并接收虚拟ECU发出的控制信号及台架传感器的信号，从而与被测ECU的代码信息和系统环境模型连接。最终实现闭环仿真，完成对控制系统的测试验证。

SIL平台应用范围广泛，除仿真测试外还可实现代码调试、标定测量、代码覆盖率分析等工作，测试人员可根据不同的功能需求来进行手工测试和自动化测试。

在V形开发模式下，通过SIL仿真平台一方面可使测试工作在开发过程中更早介入，确保前期开发过程中通过对软件的测试及时发现存在的问题，以提高整改效率；另一方面，由于SIL测试采用纯软件仿真的手段，无需真实车辆及硬件在环仿真台架测试。可在开发和测试过程中灵活使用，因而SIL仿真测试系统正在成为一种理想的功能测试工具。

2.3 硬件在环仿真

当测试进行到硬件在环仿真这一阶段，就需要有控制器系统的实物，它包括硬件、底层代码和应用层代码，并且必要时还需要被控对象的部分实物来组成一个闭环系统。

HIL测试系统是以实时处理器运行仿真模型来模拟受控对象的运行状态，主要由三部分组成：硬件平台、实验管理软件和实时软件模型。通过I/O接口与被

测的ECU连接，对被测ECU进行全面的、系统的测试。从安全性、可行性和合理的成本上考虑，HIL仿真测试已经成为ECU开发流程中非常重要的一环，减少了实车路测的次数，缩短开发时间和降低成本的同时提高ECU的软件质量，降低风险。

HIL测试中，自动驾驶系统的部分部件或系统是真实的，而环境是虚拟的。自动驾驶汽车的环境感知系统、决策规划系统和控制执行系统均可实现硬件在环测试。

与SIL不同的是，SIL主要为控制器与控制对象在功能上的仿真，而HIL则为真实的ECU与虚拟控制对象的仿真测试，而快速控制原型（Rapid Control Prototype, RCP）中，开发工具是作为控制器与实验对象相连，而HIL中开发平台作为控制对象，模拟控制对象产生信号，用来检验开发的控制算法的正确性和可靠性。

2.4 整车在环仿真

整车在环仿真测试，即整车作为实物硬件被连接到虚拟的测试环境中进行测试，这比硬件在环测试更加复杂。

VeHIL仿真测试将ADAS系统集成到真实车辆中，并通过实时仿真机及仿真软件模拟道路、交通场景以及传感器信号，从而构成完整测试环境的方法，可实现ADAS功能验证、各场景仿真测试、与整车相关电控系统的匹配及集成测试等。整车在环仿真测试目前有两种方案：封闭场地车辆在环测试、转鼓平台车辆在环测试。这两种方案的特点和测试需求各不相同。

封闭场地车辆在环测试指车辆在封闭的空旷场地上进行测试，场景仿真系统生成虚拟场景，由传感器模型和传感器信号模拟软件生成基于虚拟场景的传感器信号，并发送给ECU，ECU根据环境感知数据进行决策规划和任务执行，同时场景模拟软件读取车辆导航及航向信息用于更新参数，并根据新的位置信息给出传感器模拟信号，如此循环进行。

上海安亭建立了汽车研发领域内中国第一个智能网联硬件在环实验室，主要针对转鼓平台车辆在环测试。测试车辆将被置于转鼓上，通过转动模拟车辆运

动, 利用相对运动原理构建与被测车辆的交互环境, 可将复杂道路场景在实验室中通过可控的环境进行复现, 便于集成气象、电磁、通信等多种耦合环境的模拟, 解决目前道路测试存在的效率低、成本高以及重复性差等问题。

总的来说, VeHIL仿真测试系统是介于虚拟测试与实车道路测试之间的一种测试方法, 是自动驾驶汽车完整测试工具链中不可或缺的一环。它弥补了实车测试与传统HIL测试之间的鸿沟, 有如下优势: 1) 实现快速的场景及驾驶测试, 高效的验证各控制器的功能; 2) 可以测试ADAS系统与执行系统(动力系统、制动系统、转向系统)间的交互功能; 3) 降低实车测试的难度和风险, 减少交通事故和风险; 4) 减少对场地, 真实交通和试验车辆的需求, 可复用SIL和HIL测试的测试场景。

3 实车测试

仿真测试是重要的手段方法, 但它不能完全替代道路测试。根据Waymo的报告, 通用的智能驾驶测试手段与方法各自的优缺点如表1所示。

表1 通用智能驾驶测试手段与方法优缺点

测试方法	优点	缺点
仿真测试	1. 测试环境搭建方便; 2. 测试场景重复性好; 3. 无测试安全性问题; 4. 测试效率高; 5. 可在开发早期测试。	由于模型仿真精度的原因, 部分性能测试和标定无法实现。
封闭场地测试	1. 测试安全性较高; 2. 可进行性能测试和标定。	1. 测试场景较为简单, 一般只能进行某些功能验证; 2. 测试场地投资成本较高; 3. 测试效率较低。
道路测试	1. 可进行性能测试和标定; 2. 测试场景丰富; 3. 测试验证最终环境。	1. 测试安全性较低, 适用于比较成熟的智能驾驶系统验证; 2. 测试效率较低。

由此可见, 封闭场地测试和道路测试的优点(如封闭场地内测试的安全性高), 可进行性能测试标定, 这是仿真测试不具备的。另外, 道路测试的优点(如测试验证最终环境), 并且, 测试验证最终是需要通过道路测试来实现的。

3.1 封闭道路测试

现有的自动驾驶汽车测试以虚拟测试为主、真实道路测试为辅, 但其虚拟环境以及测试结果的有效性仍有待论证。因

此在当前技术条件下, 实际道路环境下的技术试验对自动驾驶技术测试有着不可替代的地位。

目前, 从国内一些封闭场地的测试项目来看, 更多的是借鉴机动车驾驶人考试的设置项目, 如起步、停车、跟车等, 侧重于对自动驾驶汽车基本驾驶技能考核, 缺乏“决策能力”“安全意识”等方面的评估。为降低自动驾驶汽车在复杂交通环境中运行的风险, 通过封闭场地测试对自动驾驶汽车开展“能力”评价仍需进一步研究完善。

开展自动驾驶汽车封闭场地测试应包含以下几个方面: 一是封闭场地测试作为开展公共道路测试的“门槛”, 其测试项目应能全面覆盖典型交通环境下的感知、决策、控制和网联功能; 二是注重对自动驾驶汽车“安全驾驶意识”测试, 发展自动驾驶汽车的目的之一, 就是为了减少道路交通事故、提升道路交通安全水平, 因此封闭场地测试必须将“安全驾驶意识”纳入考核范围; 三是封闭场地测试应覆盖城市、郊区、乡村和高速公路场景等我国典型道路环境; 四是为满足自动驾驶汽车测试的多变需求, 封闭场地测试应涵盖安全、舒适等性能的常规测试, 以及对突发场景应变能力的智能测试, 通过场景的优化布局及组合, 最终实现封闭环境中的道路条件多样性测试和复杂场景的柔性测试。

从国内主要示范区开展自动驾驶汽车封闭测试情况来看, 上海智能网联示范区是国内首个国家级智能网联汽车示范区, 自2016年6月开园以来已建成200个智能驾驶测试场景以及50余种V2X测试场景, 累计为70多家国内外企业提供1100余天次的测试服务; 国家智能汽车与智慧交通(北京)示范区海淀基地于2018年2月正式对外开放, 按照车辆自动驾驶能力分成T1-T5等级对自动驾驶汽车进行评估测试, 是北京首个T5级别自动驾驶封闭测试场, 全面支持北京市12米以下自动驾驶汽车全等级全场景测试; 国家智能交通综合测试基地建成国内首个专门用于自动驾驶测试的封闭高速公路环

境，并正式开展测试工作。

3.2 开放道路测试

自动驾驶汽车研制投产的最终目的还是让汽车在实际场景中自动运行，这就需要在开放道路中进行大量的试验。全面验证自动驾驶功能，实现与道路、设施及其他交通参与者的协调，这是自动驾驶汽车技术研发和应用过程中必不可少的步骤。另一方面，在仿真测试和封闭道路测试中，测试场景难以穷尽，而实际的开放道路测试有太多的特殊场景出现，通过大量的实际道路测试，对验证整个自动驾驶系统具有不可替代的作用。

自动驾驶汽车开展开放道路测试主要面临两个挑战：一是复杂道路环境带来的挑战，我国道路环境和交通构成相对复杂、机动车驾驶人驾驶行为多样化，自动驾驶汽车如何正确识别并做出准确响应是面临的挑战之一；二是自动驾驶汽车和人工驾驶汽车混行带来的挑战，自动驾驶汽车如何正确感知其他车辆，正确识别外界声光信号，及时向外界发出声光信号，实现与人工驾驶汽车的有效协同并行，也是面临的挑战之一。

美国、德国、日本等国家和地区已基本上进入开放道路测试阶段。美国已有包括加利福尼亚州、亚利桑那州、德克萨斯州、俄亥俄州等20多个州允许自动驾驶车辆在开放道路上测试。即使在发生UBER致死事件后，美国也并未停止推进自动驾驶道路测试的步伐。

谷歌公司自动驾驶汽车自2012年起在美国多个州上路测试，实际行驶道路已累计突破800万英里。传统的汽车制造商大众、奔驰、特斯拉、福特等多家汽车企业也很早就陆续开展了自动驾驶实际道路测试。目前，福特第三代自动驾驶测试车已开始在美国的匹兹堡、帕洛阿尔托、迈阿密、华盛顿、底特律等5座城市进行公开道路测试。更多的测试城市能够提供更为错综复杂的道路环境。比如，华盛顿特区常见的环岛路口、匹兹堡常见的多交叉路口，以及汽车城底特律丰富多样的道路类型，包括宽阔但无车道线的道路或是两边停满车的狭窄道路等，能够覆盖现实世界中几乎所有的道路环境，帮助自动驾驶车辆更好地训练在真实环境中的处理能力。

以德国为代表的欧洲国家在技术发展方面一直紧

跟美国，2016年以来在多个层面上开展自动驾驶技术研发，目前自动驾驶1级-2级已经实现产业化，3级-4级以上技术也处于大规模开放道路测试阶段，预计2020年左右可实现产业化。

当前，我国自动驾驶道路测试正处于封闭园区测试向开放特定道路测试的过渡阶段。目前北京在经济技术开发区、顺义区高丽营镇、海淀区苏家坨镇和上庄镇与房山区共44条道路作为首批开放测试道路，共计123公里。上海规划5.6公里的典型测试路，另有嘉定区47.8公里道路正在改造，包括墨玉南路、北安德路、博园路、安驰路、安拓路等多个路段，涉及58个路口。重庆开放的礼嘉环线全长12.5公里，覆盖12个典型路口，包括金通大道、礼仁街、金渝大道，涵盖学校、住宅区、物流园区等场景，综合路况多样的道路，发挥其区域优势。另有广州、深圳、长沙也开放了部分安全性高的公共道路，以上这些开放道路暂时还不包含高速公路。

当前，我国自动驾驶道路测试还存在一些亟待解决的问题。这些问题主要表现在三个方面：首先是缺乏完善的自动驾驶测试理论和方法，尚未形成覆盖不同等级自动驾驶的完整测试体系；二是我国人口密集、交通环境复杂，当前各地已开放的测试道路和测试场景有限，尚不能满足各类主体的测试需求；三是支持道路测试的法律法规标准还亟待完善。

4 结语

目前，自动驾驶技术受到了国家层面的高度关注，国家发展顶层设计战略之一的制造强国战略中，将智能网联汽车作为国家的重点发展方向之一。同时，应当意识到自动驾驶汽车测试依然是一项极具挑战性的工作，一方面国际上尚不具备完整的测试和评价方案，另一方面我国自动驾驶技术起步较晚，还有很多的工作需要探索。

基金项目：道路交通集成优化与安全分析技术国家工程实验室资助项目(2019SJGC07)

(魏建龙 袁建华 王敏 道路交通集成优化与安全分析技术国家工程实验室自动驾驶测试技术研发组)