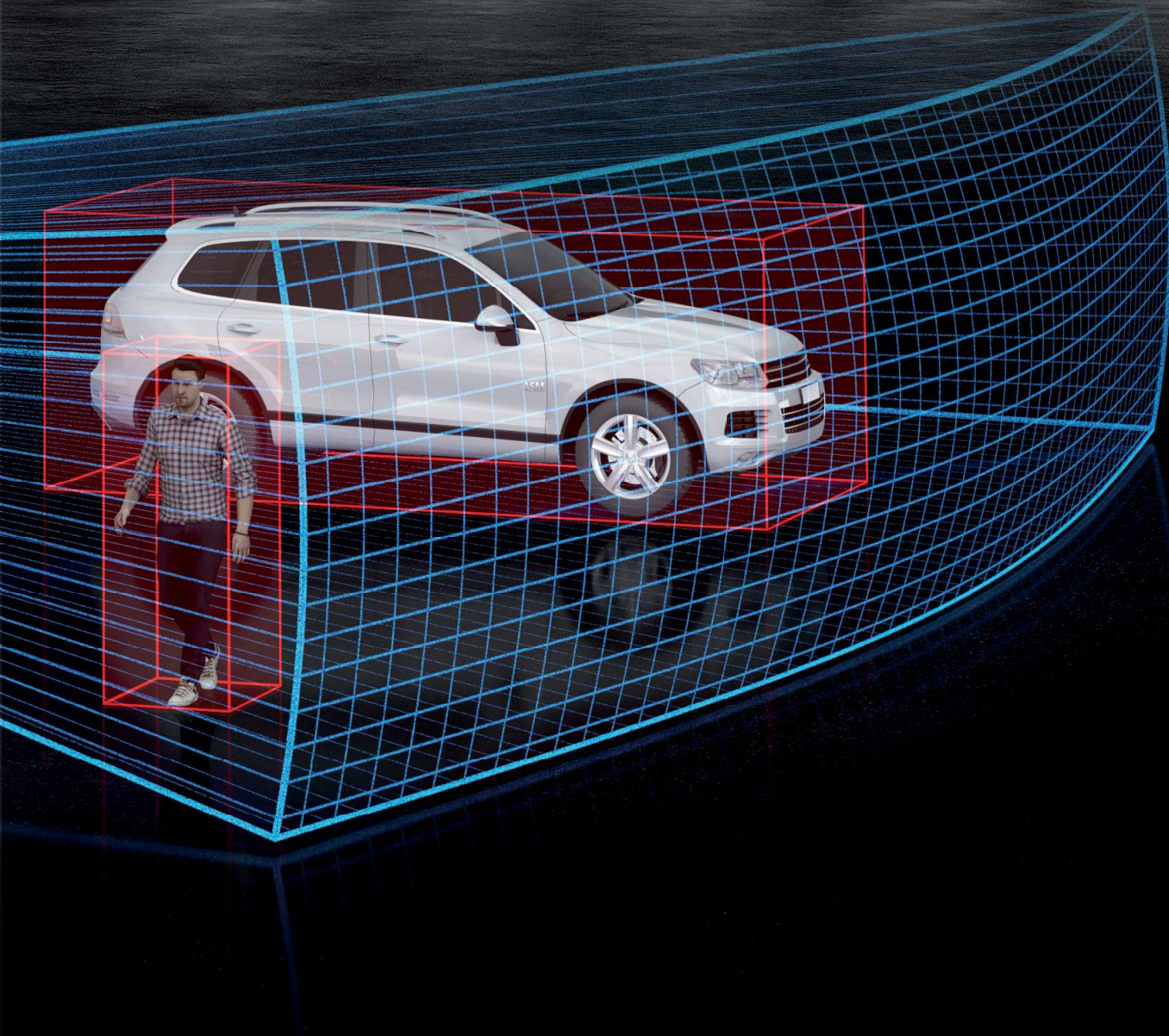


目标

捕获

通过真实的传感器仿真验证自动驾驶功能

自动驾驶汽车通过传感器观察驾驶环境。为了在早期阶段有效地验证车辆功能，必须在虚拟驾驶测试中对环境、传感器和车辆进行真实的仿真和测试。为此，dSPACE 提供了一个集成工具链，具有功能强大的硬件和软件。



毋庸置疑，自动驾驶汽车已成为道路交通的重要组成部分。真正的问题是何时才能将其投入驾驶应用。预计将在2020/2021年就会推出4级车辆，并进行批量生产。为了实现此目标，对仍处于开发阶段的车辆进行驾驶功能验证显得至关重要。因此，开发人员

必须能够在准实际交通场景中结合实验室中的环境传感器（摄像头、激光雷达、雷达等）仿真驾驶功能。替代方案是在道路上进行实际驾驶测试，然而这种做法并不可行，原因很简单，因为这需要让真实车辆行驶数百万公里才能覆盖所需的全部场景。

验证流程的条件

在验证自动驾驶功能时，有很多重要条件。

- 自动驾驶和高度自动化驾驶的功能极其复杂，部分原因是因为必须同时考虑来自多个（有时超过40个）传感器（摄像头、激光雷达、雷达等）的测量值。 >>



图 1：ADAS 和 AD 功能仿真环境的基础结构。借助标准 PC 技术 (MIL/SIL) 或通过添加实际控制单元 (HIL)，可以进行纯虚拟仿真。

- 被测试的交通场景类型 (车辆、行人、交通标志等) 几乎没有限制, 这意味着需要复杂的虚拟 3D 场景来进行测试。
- 发射或捕获光脉冲、微波等涉及的物理过程必须进行集成, 作为物理环境和传感器模型, 这种模型需要大量计算。这还包括对象材料属性的影响, 例如电容率和粗糙度。
- 测试期间, 必须进行数百万公里的虚拟驾驶, 以确保符合 ISO 26262 标准 (道路车辆 - 功能安全)。此外, 必须特别注意极端驾驶情况, 以确保按照要求, 实现正确的驾驶模式。

dSPACE 提供了一个强大的工具链, 其中包括硬件和软件, 在整个开发过程中将传感器仿真的所有前提条件都考虑在内。这有助于开发人员在早期阶段及时识别错误, 从而设计出非常高效的测试流程。

必要的仿真

为了满足验证流程的要求, 必须在开发过程的每个阶段验证和确认驾驶功能。仿真是执行此操作的最有效方法。由于自动驾驶功能非常复杂, 因此在开发过程的所有阶段, 从模型在环 (MIL) 到软件在环 (SIL), 再到硬件在环 (HIL), 相关测试案例在所有平台上必须可再现, 并可复用, 这一点至关重要。这只能通过集成式工具链来实现。

仿真环境的结构

对于 MIL/SIL 和 HIL (图 1), 闭环仿真的结构是完全相同的。仿真主要包括车辆、交通、环境以及传感器仿真。接口用于将仿真传感器连接到被测设备 (用于自动驾驶的控制单元或功能软件)。此外, 用户还必须能够配置仿真模型、进行实验, 并将场景可视化。对常用接口和标准 (例如

FMI、XIL-API、OpenDrive、OpenCRG、OpenScenario 和 Open Sensor Interface) 的支持也起着重要作用, 因为这有助于集成 German In-Depth Accident Study (GIDAS) 事故数据库的数据或交通仿真工具的数据, 进行协同仿真。

车辆、交通和环境仿真

传感器仿真的基础是交通仿真, 其中不同的道路使用者可以进行交互。为此, dSPACE 提供了 Automotive Simulation Models (ASM) 工具套件, 从而可以在虚拟环境中定义虚拟驾驶测试。ASM Traffic 模型能够计算道路使用者的运动, 因此可以仿真超车动作、车道变换、交叉路口交通等。传感器模型在车辆与虚拟环境之间的交互中起决定性作用。

dSPACE 工具链在整个开发过程中提供高精度传感器仿真支持。

	<p>Environment Sensor Interface (ESI) Unit 将原始数据和目标列表注入传感器 ECU</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 强大的 FPGA，用于同步注入原始传感器数据 ■ 灵活适应各种接口
	<p>传感器仿真 PC 传感器仿真平台，用于计算环境传感器（雷达、激光雷达和摄像头）的环境模型，提供目标列表或原始数据</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 配备强大的 NVIDIA® 计算环境模型的 GPU
	<p>SCALEXIO 用于 HIL 和 RCP 项目的模块化实时系统</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 用于各种传感器（摄像头、雷达、激光雷达等）的集成选项 ■ 测试 ADAS 的完整功能链和自动驾驶系统 ■ 通过 ConfigurationDesk 轻松进行配置
	<p>VEOS 基于 PC 的仿真平台，用于在早期开发阶段验证 ECU 软件，独立于任何仿真硬件</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 支持 Simulink® 模型（例如 dSPACE ASM） ■ 与集群的可扩展组合 – 比实时更快地进行仿真
	<p>汽车仿真模型 (ASM) 用于仿真汽车应用的各种型号的工具套件</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 驾驶操控、道路、车辆、道路使用者、交通对象、车辆传感器等的仿真 ■ 使用 ModelDesk 进行模型参数化
	<p>MotionDesk 用于 3D 动画和传感器仿真的软件</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 3D 实时可视化交通场景并生成视频片段，用于测试黑白、立体和鱼眼摄像头 ■ 传感器环境模型，带有雷达、摄像头和超声波传感器的对象列表以及 3D 点云数据

图 2 : dSPACE 工具链中用于传感器仿真的关键产品概述。

传感器的结构和功能

使用传感器的目的是通过使用传感器原始数据来确定目标以检测对象。例如，数据可能包括恒定相对速度下所记录反射点的局部累积。下一步，通过这些反射点的特征排列来识别被分类的对象（汽车、行人、交通标志等）。摄像头、雷达和激光雷达传感器的基本设计非常相似：它们都是由能够预处理数据的前端组成。在后续步骤中，数据处理单元生成原始数据流并输出目标列表。接下来，另一个单元生成对象列表，从而提供位置数据。紧接着是应用程序逻辑和网络管理。

传感器仿真中所用传感器的集成选项

不同类型传感器具有相似结构，因此在仿真过程中能够轻松集成，并且可以根据需要将准备的仿真数据注入各个数据处理单元中（图 4）。集成选项的选择取决于传感器在仿真中所需的完整性和真实性，以及传感器的被测组件。例如，OTA 激励用于将环境仿真馈送到基于摄像头的控制单元（选项 4）。摄像头传感器捕获监视器的图像，监视器会以动画形式显示周围场景。此方法允许测试整个处理链，包括摄像头和图像传感器。数字传感器的数据（选项 3）可分为原始传感器数据，即在数据预处理后直接

返回的数据（选项 3b）和目标列表（选项 3a）。例如，对于摄像头传感器，则是图像数据流（原始数据）或检测到的目标（目标列表）。下一级别是包含已分类目标和事务数据的对象列表（选项 2）。残余总线仿真用于独立于传感器的测试（选项 1）。通过对对象、目标列表以及原始数据进行仿真是 HIL 和 SIL 仿真的一种应用场景，而 OTA 激励和残余总线仿真则是 HIL 专用应用案例。

传感器建模的类型

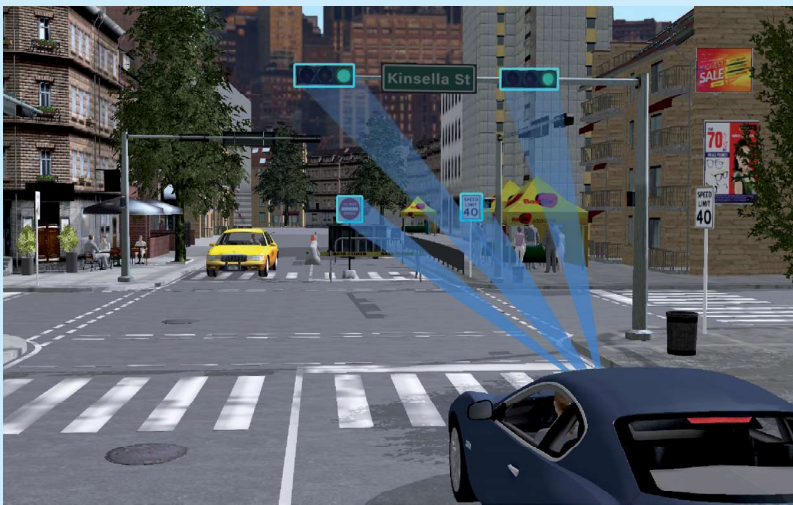
每个传感器集成选项都需要一个传感器模型来提供处理好的数据。从本质

>>

物理/现象学模型

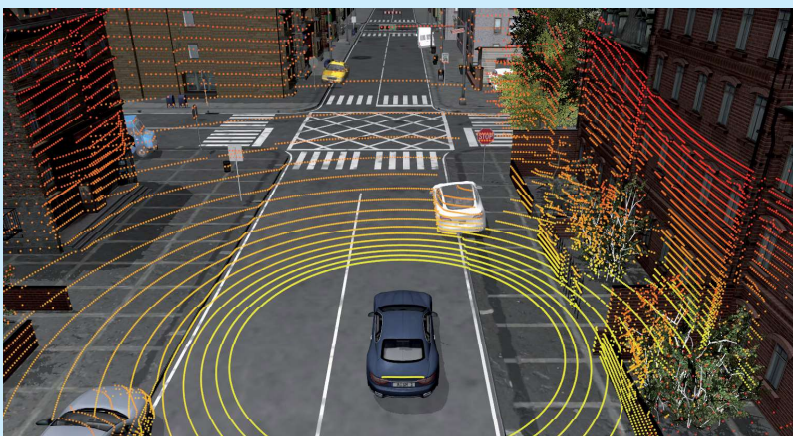
dSPACE 开发了高精度的物理传感器环境模型，用于仿真摄像头、雷达和激光雷达传感器。这些传感器通常提供原始数据或目标列表。它们用于在图形处理单元 (GPU) 上进行计算。

摄像头模型



验证基于摄像头的辅助和自动驾驶功能时，需要考虑不同的镜头类型，以及镜片上的色差或渐晕等光学效果。我们必须也能仿真不同数量的图像传感器（黑白/立体摄像头）或多个摄像头，获取全景视图。此外，传感器特性、颜色（单色表示、拜耳模式、HDR 等）、像素错误和图像噪声对验证有着重要影响。

激光雷达模型



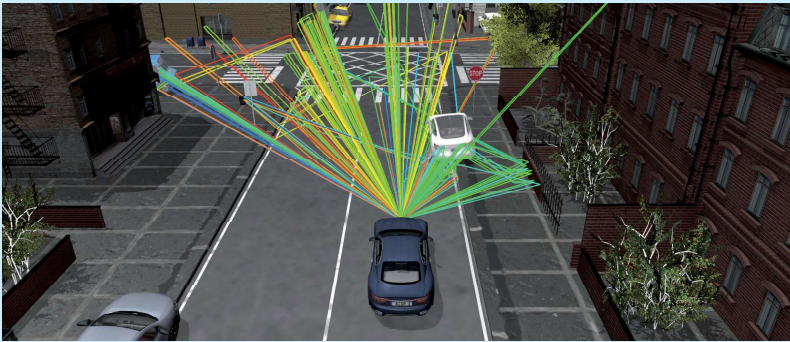
激光雷达系统发出激光脉冲并测量对象反射的光。然后，可以根据运行时间计算对象的距离。除了距离外，系统还会根据对象表面的情况

确定反射光的强度。该测量方法允许以点云的形式描述环境，也就是说，数据可用作目标列表，显示距离和强度信息。此外，在激光雷达

模型中，必须能够为光波配置传感器的特定操作模式（包括角分辨率），并且 3D 场景中使用的对象必须具有表面特性，例如反射率。此外，还必须考虑到，由于雨、雪或雾等天气状况，光会被不同程度地散射，并且单个光束会被多个对象反射。这会导致传感器表面上出现振幅分布，其取决于环境（移动对象、非移动对象等）或时间。激光雷达模型支持从点云到原始数据的各种方法。

>>

雷达环境模型



雷达在 ADAS/AD 驾驶功能中起着重要作用，因为它在恶劣天气状况下（如雨、雪和雾）以及极端光照条件下也能发挥强大作用。雷达传感器不仅可以确定对象的类型，即车辆、

行人、骑车者等，还可以测量它们的距离、垂直和水平角度以及相对和绝对速度。最重要的雷达技术之一可能是调频连续波雷达（FMCW，也称为连续波雷达），其能够使用调频

信号。现代雷达系统在一个测量周期内传输大约 128 个调频信号。雷达探测到对象反射的信号 – 也称为回波信号。频率变化和生成的信号可以帮助测量对象的距离。对象的速度通过多普勒频率确定。dSPACE 的雷达模型真实地再现了传感器路径的行为。例如，对多径传播、反射和散射中的因素进行建模。

上来说，传感器仿真模型可以根据它们的复杂程度以及与实际情况的接近程度进行分类（图 3）。两种类型的模型将返回对象或目标列表：基于真实参考数据的真值模型，以及基于事件或状态概率的概率模型。原始数据通常根据事件和状态的参数，由现象模型提供，或基于数学公式的定律，通过物理模型提供。根据应用和开发时间的不同，将开发的驾驶功能可通过适当的模型进行验证。

真值模型和概率模型

ASM Traffic 仿真模型包含大量传感器，用于在 SIL 或 HIL 案例中以对象列表级别执行测试：

- 雷达传感器 3D
- 对象传感器 2D/3D
- 自定义传感器

- 道路标志传感器
- 车道标识传感器

这些传感器模型设计与 VEOS 或 SCALEXIO 平台相结合，专用于基于 CPU 的仿真。根据对象列表，概率模型可以叠加实际效果，例如雾雨天等环境条件，并能为每个检测到的对象提供多个目标。所有这些模型都可用于仿真雷达特征并计算目标列表。

通过软件在环仿真进行验证

通过使用软件在环（SIL）仿真，基于传感器的控制单元的软件可以借助标准 PC 技术进行虚拟验证。该仿真能够在硬件原型尚不可用的早期阶段进行算法测试。此外，VEOS（图 1）和相应的模型使计算速度比实时计算更快。另外，我们还能在可扩展的 PC 集群上执行计算，进一步提高速度。

这样能够管理大量不同种类的测试案例，并且还可以及时执行长达数百万公里的驾驶测试。在 SIL 仿真中，车辆、环境和交通仿真以及虚拟控制单元（如果适用）均通过 VEOS 进行计算。如果仿真基于真值和概率模型，则这些模型也会集成到 VEOS 中。无论何时使用现象学或物理传感器模型，在 GPU 上计算的传感器仿真（摄像头、雷达、激光雷达）应用都会在与 VEOS 相同的平台上运行。环境仿真的运动数据被传输到传感器仿真中，然后计算雷达、激光雷达或摄像头传感器的模型。这意味着，考虑到传感器的物理特性，原始数据将使用运动数据和复杂的 3D 场景进行仿真，并且这些场景具有真实的环境和复杂的对象。例如，该计算在高性能图形处理器上执行，以仿真相关的光线追踪算法，用于雷达和激光雷达

>>

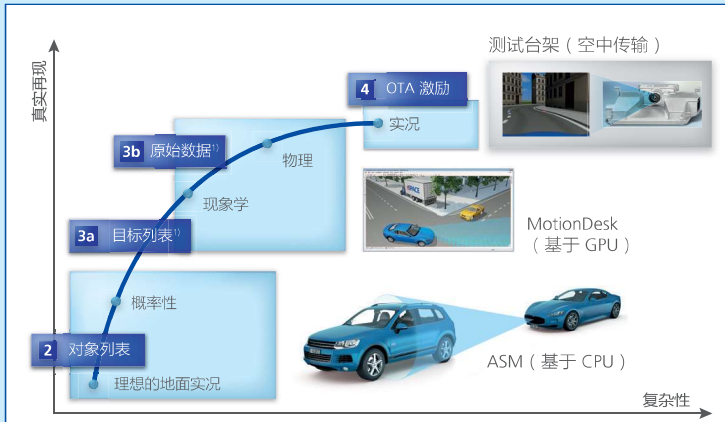


图 3：传感器仿真中不同可能性的真实程度和复杂性之间的相互关系。

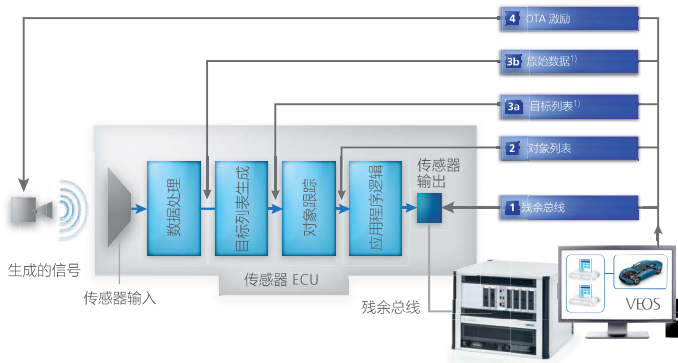


图 4：用于激励/仿真环境传感器的各种选项的概述。

4 OTA 仿真	传感器 OTA 激励
	<ul style="list-style-type: none"> 处理传感器信号 无需操作传感器硬件 传感器 ECU 可视为黑盒
3b 原始数据¹⁾	注入原始数据
	<ul style="list-style-type: none"> 传感器最原始的数字信号数据
3a 目标列表¹⁾	注入目标列表
	<ul style="list-style-type: none"> 点云的集群数据
2 对象列表	注入对象列表
	<ul style="list-style-type: none"> 已标识对象的列表，包括位置和对对象类型（车辆、行人、狗等）等属性
1 残余总线	残余总线仿真
	<ul style="list-style-type: none"> 整个控制单元进行旁路 将仿真结果直接传输到汽车总线系统

¹⁾ 选项 3a 和 3b 描述了不同对象识别阶段的数字传感器数据。

的环境模型计算。然后，将该传感器仿真的结果传输到基于虚拟传感器的控制单元。这可通过以太网或虚拟以太网完成。通过相同的技术可将基于虚拟传感器的控制单元与车辆仿真进行交换。

通过硬件在环仿真进行验证

硬件在环 (HIL) 仿真支持通过记录数据或人工测试数据来激励 ECU，并在实验室中测试真实的 ECU。与 SIL 仿真相反，HIL 仿真可以深入到控制单元确切的时间行为。dSPACE SCALEXIO HIL 平台执行交通、车辆动力学和环境仿真，然后将车辆仿真连接到车辆网络，例如，通过 CAN 或以太网进行连接，执行残余总线仿真。车辆和其它对象的运动数据通过以太网发送到具有高性能图形处理器的强大 PC 上，在该处理器上计算摄像头、激光雷达和雷达的传感器环境模型。来自各种传感器的数据（原始数据或目标列表）通过显示端口进行整合并传输到 Environment Sensor Interface (ESI) Unit 单元。ESI 单元采用高度模块化的设计，可为所有相关协议和接口提供支持。ESI 单元的高性能 FPGA 将来自所有传感器的数据流转换为专用传感器的单独数据流，并通过各种接口将其传输到相应的摄像头、激光雷达或雷达控制单元。

通过 OTA 激励进行验证

OTA 激励是测试传感器的经典方法。该方法将整个基于传感器的控制单元集成到控制回路中（图 5）。此设计特别适用于测试传感器前端，如摄像头的镜头和图像传感器。此方法使用 SCALEXIO 计算车辆、环境和交通仿真。如果要测试摄像头传感器，则会使用 SCALEXIO 仿真器和 MotionDesk

dSPACE 的物理传感器模型以最高精度仿真摄像头、激光雷达和雷达传感器的原始数据。

在屏幕上仿真和显示交通场景。然后，摄像头使用虚拟场景表示真实街景。我们利用 dSPACE Automotive Radar Test System (DARTS)通过根据 SCALEXIO 仿真器计算出驾驶场景，并根据这些场景将雷达回波对准雷达传感器。这样，我们能够对驾驶功能进行验证，例如 ACC（自适应巡航控制系统）或 AEB（自动紧急制动系统）。

由于这种测试和工具环境十分复杂，顺利进行验证的关键在于灵活的集成工具链，其可为仿真模型和被测车辆提供通用接口和集成选项。dSPACE 传感器和环境仿真工具链如此强大有效的原因在于：它提供一站式的协调工具，这些工具可以顺利进行交互，从而使验证过程非常高效。■

总结

ADAS/AD 功能必须在所有可能的驾驶场景中做出正确决策，才能保证自动驾驶车辆在道路交通中安全行驶。但是，由于可能的驾驶场景几乎数不胜数，因此在实验室中测试所需的 ADAS/AD 功能变得非常复杂。只使用一种测试方法无法再执行这些测试，因此我们需要将不同测试方法进行组合。这些方法包括 MIL、SIL、HIL、开环和闭环测试以及实际驾驶测试。

图 5：各种环境传感器的 OTA 激励原理。

