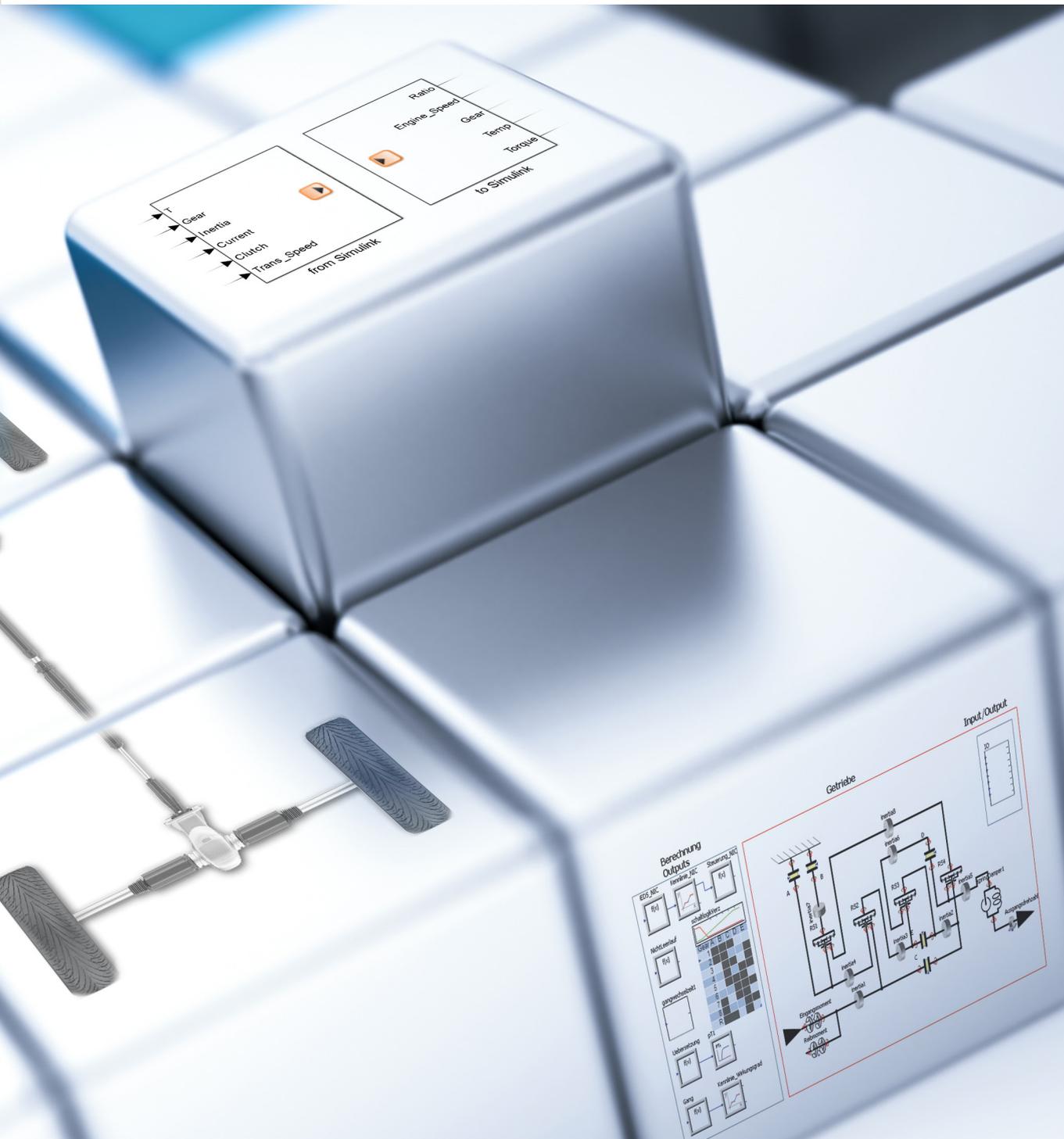


HIL 试点项目，交换基于 FMI 的子模型

模型始终

正确
无误

硬件在环测试需要使用满足实时性要求的模型，同时，该模型需要具有一定的精度。宝马公司、ITI 和 dSPACE 通过一种不依赖工具的开放式接口共同测试实时模型组件的交换和使用。



在一个联合项目中，宝马公司、dSPACE 和 ITI 使用了一个自动变速箱模型来分析 FMI (Functional Mock-up) 标准 2.0 是否适用于实时硬件在环仿真。三家公司还测试了一个过程原型，以使用基于 FMI 的子模型替代现有仿真模型中的子模型。

测试系统的设置

使用 HIL 仿真器测试 ECU 时，为了使仿真足够准确并防止 ECU 故障码的出现，需要满足两个条件：一是 ECU 接口与 HIL 仿真器之间能够正确进行交互，二是使用真实的仿真模型。这是为了真实地测试 ECU 的行为。由于测试的执行需要真实的测试场景，该项目为一个 8 档自动变速箱的 ECU 配置了 HIL 设备和环境仿真模型（这些模型经调整后可以在 dSPACE HIL 仿真器 SCALEXIO 上运行）中。除

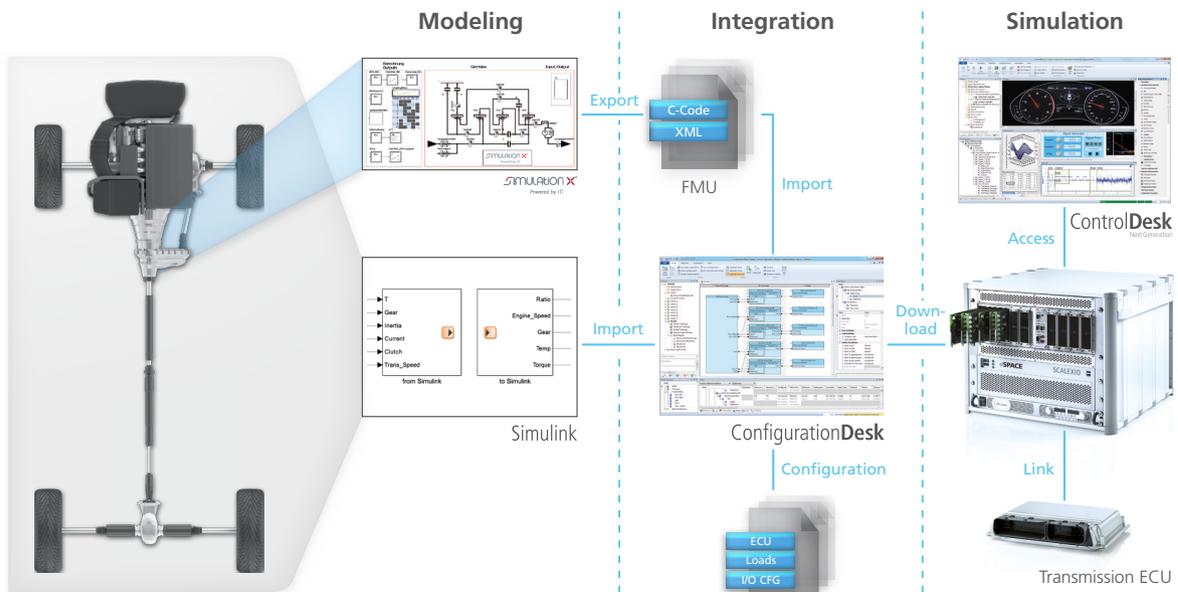
使用了 MATLAB®/Simulink® 以及 ITI SimulationX® 建模工具外，该项目还使用了 dSPACE 的 ConfigurationDesk® 软件来配置 SCALEXIO 系统和 dSPACE ControlDesk® Next Generation 来控制 HIL 仿真过程（图 1）。

FMI 思路

FMI 的基本思路是避免冗余工作：其目标是在不同的开发阶段以及公司的不同部门重复使用现有的仿真模型，而这些仿真模型可能来自不同的供应商。这就需要有一个标准，使得来自不同供应商、不同开发工具开发的环境模型可以更加容易的进行移植和集成。FMI 便是这样一种不依赖开发工具的开放式标准。它允许工程师使用完美的建模方法来建立每一个子模型，并且将这些子模型集成到一个项目中。子模型通过 FMU (Functional Mock-up Units) 进行传输。FMU 采

用压缩文件夹结构，含有模型功能文件，以及所需的接口文件（与 ANSI-C 兼容的 API 和 XML 文件）。用户还能添加文档和模型要求的其他数据。FMI 2.0 标准的新功能有利于实施 HIL 项目，比如有可能在仿真运行期间调整参数值、直接为经过优化的实时求解器定义步长等。因此该项目使用了 Co-Simulation FMI 2.0。在 Co-Simulation FMI 中，FMU 中已包含了合适的、针对于实时环境而优化的求解器。

图 1：整个系统的配置。Simulink 模型和 ITI 提供的 FMU 单元通过 ConfigurationDesk 集成为一个整体模型。该整体模型经过配置后加载到 SCALEXIO 中以进行 HIL 仿真。仿真过程通过 ControlDesk Next Generation 进行控制。



新模型的优点

该项目旨在利用所述的 FMI 优点将基于 Modelica 的非因果动态变速箱新模型集成在基于 Simulink 的整个动力传动系模型中。其目标是在仿真变速箱的整个行为时更好地表现其弹性行为。为此 ITI 在 SimulationX 中对四组具有可变传动比的行星齿轮进行了建模，其中包括相关的惯性、弹性以及输入扭矩、输出扭矩和摩擦扭矩。可切换式离合器被建模为具有合适的物理摩擦行为的摩擦表面，其中还包含了锁止与解锁状态之间的切换。这些离合器由一个换挡逻辑单元进行控制，逻辑单元中含有一个依赖速度和扭矩的换挡图。图 2 介绍了使用简

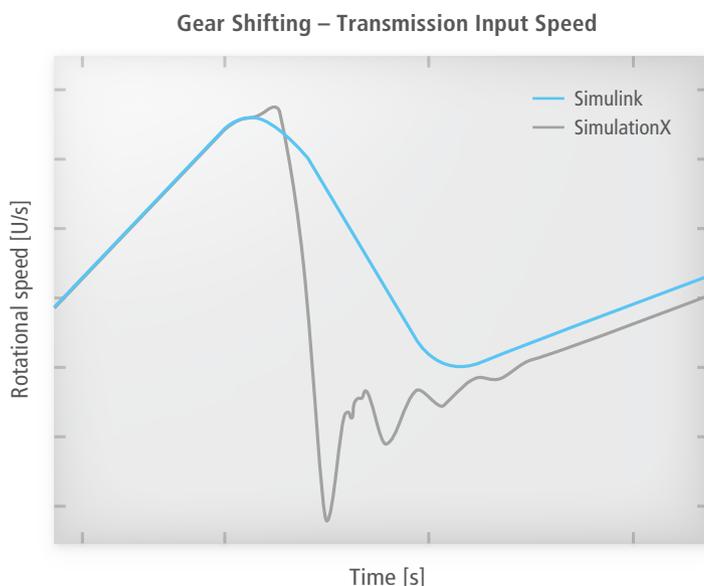
单的 Simulink 模型与使用 SimulationX 模型时变速箱动态行为仿真精度的差异。传动系的环境模型是在 1 ms 的步长中进行计算的。在 SimulationX 中进行建模并导出为 FMU 的新的变速箱子模型必须满足 1ms 步长的实时性要求。

集成新模型

项目开始时定义了变速箱模型的接口，随后在整个项目中所有的项目合作伙伴都会使用该接口。要将新的变速箱模型集成在现有的基于 Simulink 的传动系的环境模型中，开发人员需要执行以下步骤：

>>

图 2：蓝色曲线 (Simulink) 表示现有的面向信号流的变速箱模型在换挡期间的理想转速。灰色曲线 (SimulationX) 表示非因果模型中的变速箱行为，该曲线更真实，因为考虑了振动因素。



关于 FMI

2011 年，FMI 标准在 MODELISAR 项目中被首次提出，目前 Modelica 组织的 FMI 项目组正在进一步开发这一标准。该标准专注于动态系统模型（即由差分方程、代数方程和离散方程定义的模型）的交换。其当前版本 2.0 中含有有助于 HIL 仿真的新功能。其主要优点是能够定义经优化的实时求解器的步长，还能定义可调参数，便于在仿真运行期间更改其参数值。这是交互式实验和 HIL 仿真所必需的，因为控制回路含有真实硬件而无法直接重启实验和仿真。www.dspace.com/golfmi

关于 ProSTEP

ProSTEP iViP 组织 是一家国际协会，致力于开发创新的问题解决方法、产品数据管理的现代标准和虚拟产品创建的现代标准。

www.prostep.org

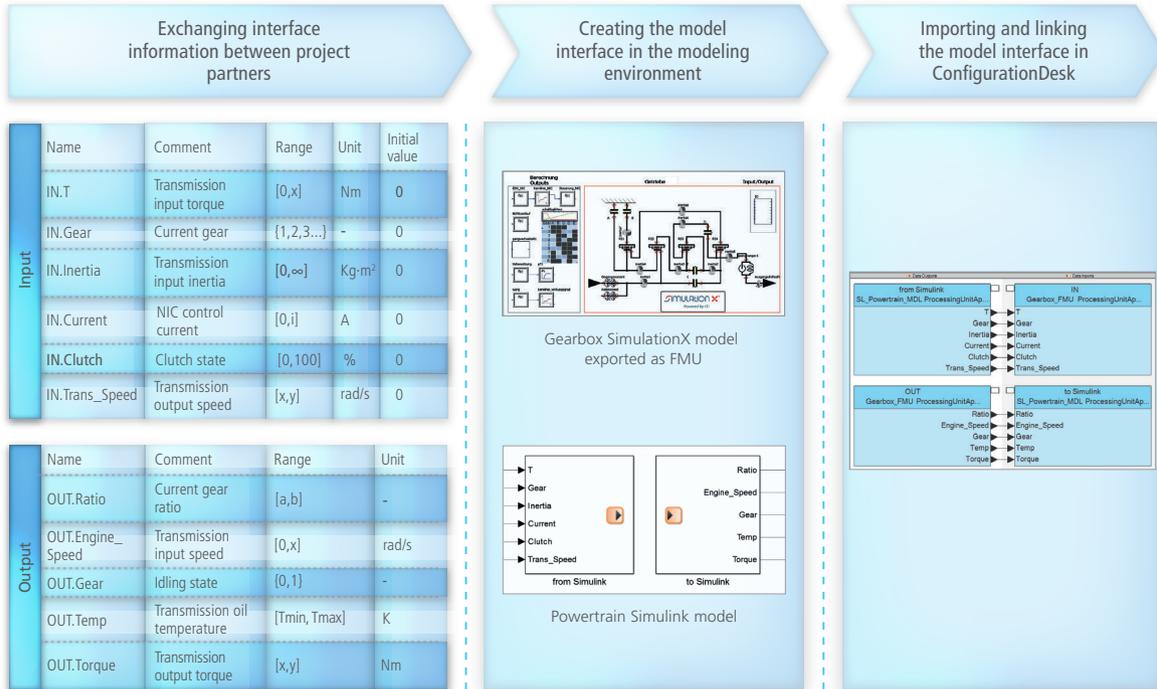


图 3：每一步工作流程都考虑和实施了预定义的建模接口。

1. 从 Simulink 模型中删除现有的简单变速箱模型
2. 使用 dSPACE Model Port 模块向 Simulink 模型中添加必要的模型接口
3. 将创建新的变速箱模型所需的数据交付给 ITI。这些数据包括：
 - a. 一个接口描述文件
 - b. 所需的模型功能
 - c. 技术框架（C 语言编译器、实时性要求等）
4. ITI 根据这些数据开发出了一个 SimulationX 物理模型，并提供了一个 FMU 单元和一个 Simulink S 函数作为测试基准。
5. 首先将 S 函数集成到模型中以测试 SimulationX 变速箱模型是否运行正确（类型 1）。随后对 FMU 单元进行集成以测试其功能的正确性（类型 2）。

测试和结果

项目合作伙伴在 dSPACE HIL 仿真器 SCALEXIO 上使用 ControlDesk Next Generation 对这两种类型进行了闭环测试，即使用 S 函数通过 Simulink 实现的集成（类型 1）和使用 ConfigurationDesk 通过 FMU 单元实现的集成（类型 2）。两种情况下被测模型的计算时间几乎完全一致，测试结果完全相同。新的变速箱模型（考虑了高达 40 Hz 的振动现象）能以 1 ms 步长进行实时计算并具有数值稳定性。因此，Co-Simulation FMI 2.0 证明了它适合实时模型的标准移植，并且独立于建模工具。这意味着 FMI 标准有助于简化部门之间的环境模型移植或交换。

工具链集成

交换模型组件只是第一步，还应该测试所交换的组件如何在现有工具链中集成。为了使适应过程尽可能快速和节省资源，必须避免对配置和实验工具进行重大调整。由于配置软件 ConfigurationDesk 支持 Simulink 和 FMI 作为环境模型的导入格式，所以基于已有的模型接口进行模型组件交换将会快速而简单。ConfigurationDesk 可以识别新的模型接口，因此能够使用新接口传递模型信号。在 ControlDesk Next Generation 软件中，FMU 的模型参数和变量与在 Simulink 模型中的参数和变量具有相同的使用方式。这使得调整和复用现有的变速箱 HIL 系统的测试文件、实验界面等变得更加容易。一旦基于 FMI 的新建变速箱模型集成在整个项目中，现有的工作流程和相关的 HIL 测试无需进行重大修改便能在项目中重复使用。

展望

ProSTEP 将该试点项目中获得的经验应用于其智能系统工程项目中，开发出了一个工作流程，用于描述各个合作伙伴在基于 FMI 的模型交换过程中应如何合作。该项目是本文描述的项目的进一步研究，致力于分析 HIL 测试过程中受知识产权保护的 FMU 的交换流程。

由宝马公司友情授权

总结

宝马公司、dSPACE 和 ITI 在一个试点项目中使用了一个自动变速箱模型来分析 FMI 标准是否适用于实时硬件在环仿真。结果表明，基于 FMI 的新的变速箱模型（在 SimulationX 中建模）能以 1 ms 步长实时进行计算并具有数值稳定性。因此 Co-Simulation FMI 2.0 适用于交换实时模型。基于 FMI 的模型容易集成在 dSPACE 工具链中，开发人员只需少量的调整就可以重复使用现有的测试和实验界面。因为自动变速箱的 ECU 在 SCALEXIO HIL 系统中可以无故障的运行，因此，现在可以考虑进行变速箱动态效果的详细测试了。

在未来，FMI 标准可用来集成最合适的模型组件，而与其制造商无关。

