



Photo: Guillaume Blanchon / SNCF



法国国家铁路公司 (SNCF) 机车车辆硬件在环 (HIL) 仿真



应用领域

- 轨道交通

相关产品

- RT-LAB
- 基于FPGA的电力电子解算器 (eHS)

仿真类型

- 硬件在环仿真(HIL)



用户成功案例

Photo: Letizia Le Fur / SNCF

项目简介

法国国家铁路公司（法语：Société Nationale des Chemins de Fer Français），简称 SNCF，成立于1938年，负责法国国有铁路的运营，包括法国高速铁路网络TGV。作为欧盟内第二大铁路公司，SNCF 日均运营约15,000车次商业列车，以及超过500万名乘客和25万吨以上的货物。

SNCF物资部负责对17,000辆机车车辆进行维护，肩负着人员和货物运输的安全保障重任。在保障机车安全稳定运行方面，机械工程团队

（SNCF称其为工程组）发挥着至关重要的作用。其中一个工程小组位于法国里昂附近，专

门从事机车牵引系统电力电子控制设备的维护，旨在通过数字仿真改进其验证过程。

本项目代号为SimHIL（英文"SIMulated Hardware In the Loop"的首字母缩写），旨在将SNCF的运营与严格的硬件在环测试结合起来，其核心目标是通过数字仿真全面改进列车电子指挥控制设备的维护工作。

本份资料中将为大家介绍SNCF和Innovation & Research共同领衔的多方合作项目的详细情况。在此，OPAL-RT向为此份资料编写提供帮助的作者和工程师们表示衷心的感谢。

"我使用OPAL-RT的实时仿真解决方案已有几年时间，在此分享给大家的经验是：在项目之初需要尽可能多地列举出你的需求。这个建议看似平平无奇，然而却能够极大程度上影响解决方案的制定以及支持项目所需的技术支持类型。"

随后，我们需要对OPAL-RT不断发展的软硬件升级保持关注：我们在电力电子仿真方面的需求正在不断变化，随之进化的还有OPAL-RT的技术解决方案。"

——Florent Chabrier
法国国家铁路公司「验证测试工具MCO」工作协调人





Alex Profit / SNCF

项目挑战

所有的机车电子牵引力控制设备都必须遵循严格的验证流程，其在线验证将产生高昂的费用，而一些极端情况下的测试（设备需求方面的操作界限和极端案例、高/低温阈值、强加速、机械冲击、软件修正等）则有可能是危险的。工程师们系统地采用硬件在环仿真来测试这些电子产品，可以有效地规避风险、降低成本并推动项目进程。

本项目的初衷是为SNCF提供一个持续性的虚拟工具，能够在不调用实际列车的前提下，实时仿真车载计算机的变化对火车运行的影响。

这样一个拥有无数顶级机车的公司为什么不用真实机车进行测试，而要费心研究虚拟模型呢？

这就是硬件在环（HIL）仿真的主要优势：

我们的实时硬件仿真器采用高度专业化的软件平台和求解器，能够为需要仿真的设备构建一个“真实的幻境”，使设备相信它是已接线连接的，并正在当下物理环境中运行着。因此，我们观测到的配置执行情况与现实情况非常接近。

这种测试方法有几个显著的优点：

1. 简单易操作；
2. 高保真度：虚拟仿真和现实测试之间的差别非常小，准确度非常高；
3. 安全且经济适用：真实列车的价格昂贵，一辆火车停运一个星期产生的费用高达数千欧元，而动态测试、破坏性或毁灭性测试将致使测试成本和安全风险激增。

项目挑战

在本案例中，硬件在环（HIL）仿真和建模工具用于复制电机牵引链，能够与被测试的车载计算机进行实时交互。控制和反馈都是双向的，实现了硬件在环（HIL）的闭环。

"SNCF 所面临的挑战是，开发有足够代表性的仿真模型，在尽可能接近实操的条件下对电子装置进行测试控制。在列车动力系统各种模型的开发过程中，SNCF物资部提供了有力的技术支持，发挥了重要作用。

此外，项目还充分考虑到了硬件在环（HIL）仿真所带来的限制。因此，SNCF仿真平台解决方案的定制经历了一段长时间的研究和对比分析。

现在，我们的仿真平台已经定制完成，每一个新的动力系统都需要进行硬件和软件开发，以应对所测试的控制电子设备的限制"，SNCF「验证测试工具MCO」工作协调人Florent Chabrier说。



SNCF团队和他们的仿真器控制台

解决方案

OPAL-RT于2013年首次参与到该研究项目当中，目标是开发一个实时仿真平台，能够对TGV（Train Grande Vitesse 高速列车）进行实时仿真。TGV系列列车使用了当时最新最复杂的技术，因此被从SNCF公司的众多机车车辆中挑选出来。

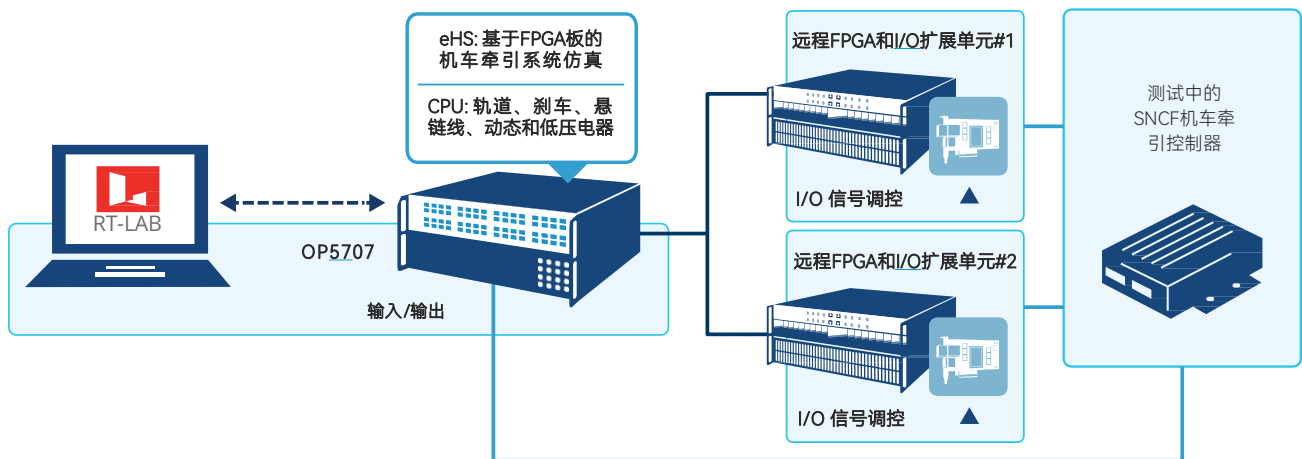
SimHIL的初衷是为SNCF提供一个仿真工具，能够对牵引链的功率曲线进行精确建模。悬链线上的扩散电流具有标志性谐波，它根据电机控制和牵引的规律而变化，SimHIL的首要目标是对该谐波进行高保真度仿真。其次，SimHIL还需要仿真能量分布（变电站、牵引线等）对电机模型运行的影响。

SNCF和OPAL-RT在经过充分沟通后，最终确定购置一台带有多核处理器的实时计算机进行研发。由于动力传动系统的电力电子模型非常复杂，因此在HIL研发的初始阶段需要进行大量的研究和建模。像OPAL-RT的ARTEMiS/SSN这样的工具，使得优化运算时间步长成为可能。一旦第四个时间元素被引入到仿真中，HIL交互

须确保命令和反馈信息在环路中运行的高保真度。

SimHIL不仅包含全数字仿真部分，还包含控制区域即硬件部分（HIL中的'H'，代表hardware 硬件），因此SimHIL是一种较为具象化的仿真方式。SimHIL的硬件与模拟机车行为的仿真器进行交互，整个过程有一台监控PC控制。这个过程听起来十分简单，但其背后需要多方协同合作与研发作为支撑。SimHIL可以分成三个部分：功率和动力学模型、低压模型和软/硬件集成。所有这些都需要付出相当多的专业知识、协作和迭代，并在研发过程中不断积累“经验教训”。

同时，OPAL-RT在FPGA组件上开发了电力电子建模工具eHS(基于FPGA的电力电子解算器)。2018年底，eHS开始在SimHIL实时仿真平台上投入使用，实现了仿真预定目标中所要求的运算时间步长。在此情况下，准确无误的模型构建尤为重要。该项目成效显著，SNCF公司依托OPAL-RT的技术演进不断推动其发展进程。





Alex Profit / SNCF

项目成果

随着仿真器使用数量的增加，其进一步的发展也在不断加快。从该项目之初，SNCF对仿真平台的定位十分清晰：**灵活、可扩展、模块化**。SimHIL确实也实现了这一目标，它除了能够与目前已研究的牵引链控制器连接外，还可实现与更多设备的交互。（OPAL-RT一直以来都注重开发和利用模块化、可扩展的组件，以便应对客户不断发展变化的需求，帮助他们实现更可靠的能源转换。）SimHIL结合了高性能的仿真器、OPAL-RT的专业团队和全方位研发支持，能够在缩减物理测试成本的同时，最大限度地降低人员及安装过程面临的安全风险。在客户应对日益增长的仿真需求时，这些优势使得SimHIL成为其必然选择。

此外，SimHIL的成功也推动了铁路法规的修订完善。起初，铁路相关法规对仿真工具持谨慎态度；随着硬件在环（HIL）仿真技术的持续发展和广泛应用，开始向着积极乐观的方向转变。在构建绿色、环保、和谐未来的大蓝图下，优化动力系统性能、减少能源消耗势在必

行，仿真工具在其中发挥着越来越重要的作用。铁路部门的管理人员和工程师们都清楚地认识到了这一点，并开始着手对相关法规进行修订。

通过证明大部分在线测试可以通过HIL仿真来完成，我们正在投入更多的精力来给这些机构以信心。现有的HIL仿真工具已经十分强大，随着进一步发展，将在现有基础上得到指数级改进和升级，其使用的模型完全能够真实地模拟SNCF在现实中可能遇到的各类挑战性情况。

未来，我们仍然面临一些技术挑战，例如：实现更小的时间步长；随着在各个领域的广泛应用，仿真器的用途也将越来越多。硬件在环（HIL）仿真器及其配置也在随着SNCF的业务发展而不断调整，以便能够在预算内按时完成新项目，并帮助SNCF应对每天多种多样的紧急状况和需求。