

通过定制 App 实现核安全 SQA 程序自动化

与核安全相关的程序都应非常严谨，即使很小的设计错误也可能会快速导致不希望发生的失败。橡树岭国家实验室的研究人员通过 COMSOL 定制了一款仿真 App，用来自动运行软件质量保证 (Software quality assurance, SQA) 验证流程，并能在 24 小时内得到反馈结果。

作者 **NATALIA SWITALA**

软件更新就像突然造访的老朋友，在通知到访前不会给你留下足够的时间准备。感到兴奋的同时，还是难免会陷入一阵慌乱。你希望一切顺利，软件升级后能向前兼容你当前正在运行的版本，并能满足全部软件质量保证 (SQA) 要求。当软件被用于一个受高度管制的环境中时，例如美国能源部 (Department of Energy, DOE) 运维的一个核研究反应堆，这一问题会变得更加突出。

⇒ SQA 程序为安全保驾护航

处理核能时有许多为避免发生失效而设置的安全防护措施，其中包括应用于反应堆设施中所有与核安全相关零件的 SQA 规定。

在美国橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL), James D. Freels 和一个团队正专心研究并开发如何将高通量同位素反应堆 (High Flux Isotope Reactor, HFIR) 的燃料从高浓缩铀 (HEU) 转换为低浓缩铀 (LEU) (见图 1)。为了响应全球减少威胁倡议，世界上大部分的核研究反应器都已经完成了这个转换过程。在 HFIR 中 LEU 转换的一个主要设计目标是为美国的凝聚态物质研究提供最高通量的中子反应源，以便继续维持其在中子源市场的竞争力。特殊的燃料和堆芯设计，以及高功率密度的 HFIR，使得燃料转换成为一个复杂且极具挑战性的任务。ORNL 的研究人员使用 COMSOL Multiphysics® 软件来探索燃料转化对 HFIR 性能及中子散射活动的影响。

DOE 规定必须严格遵守 SQA 标准。为此，ORNL 按照核安全相关条例开发并执行了相关程序。Jim 和 ORNL 团队需要验证他们所用的全部软件，包括从软件的初次安装到最后一次升级，是否能按照代码开发人员的预期运行。

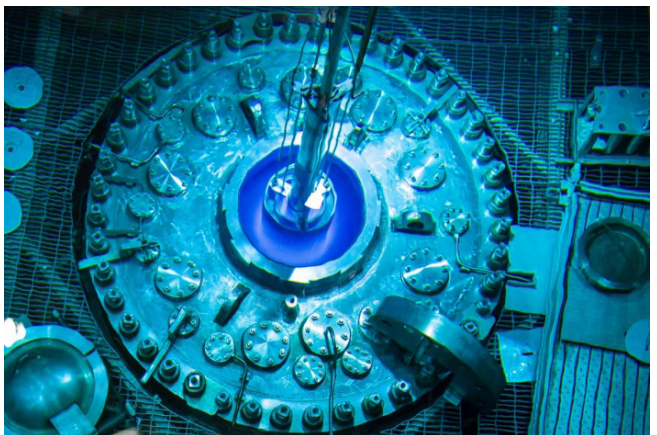
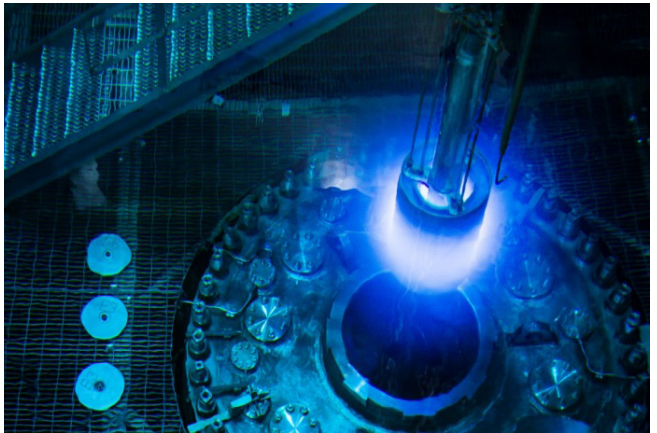


图 1. 正在进行卸燃料操作的 HFIR 反应器堆芯。

⇒ 汇报要求，安全第一！

设置 SQA 步骤是为了保证分析软件能实现预期结果。“验证本地安装的软件能否按开发人员的预期执行，这虽然

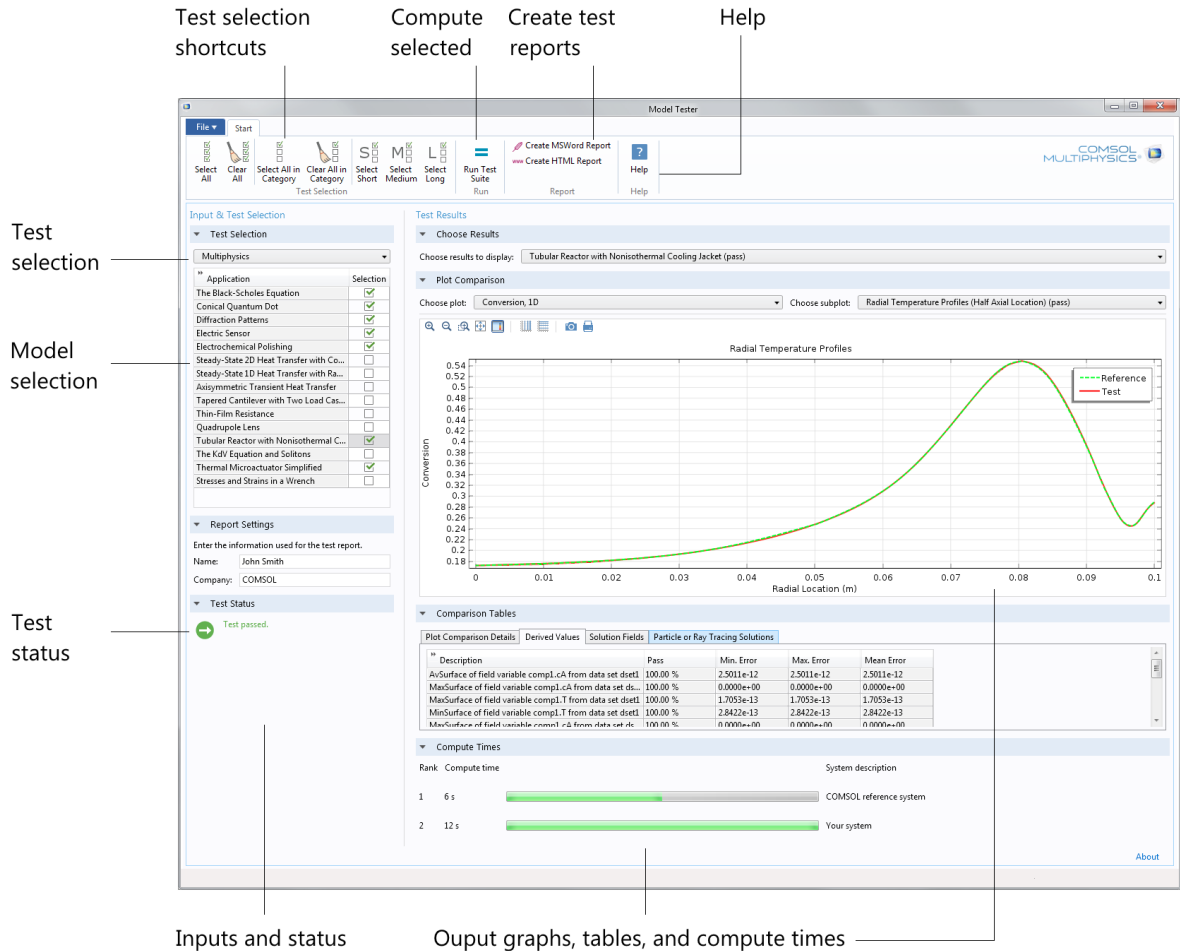


图 2. 模型测试器 App 将运行一系列模型并对比模型结果与产品文档中的值，比如温度和电势。用户将在测试完成后自动收到一份报告。图注：Test selection shortcuts - 测试选择快捷键；Compute selected - 计算选定项；Create test reports - 创建测试报告；Help - 帮助；Test selection - 测试选择；Model selection - 模型选择；Test Status - 测试状态；Inputs and status - 输入和状态；Output graphs, tables and compute times - 输出图像、表格及计算时间

很耗时，但却是核安全相关规范中必须的一步。” ORNL 的高级研究员 Jim 解释道。ORNL 将他们的 SQA 工作分为两类：验证与确认 (V&V)。

符合确认要求可能是最难达到的，因为理想情况是能对实验、测试或操作数据进行直接比较，以便评估代码的准确度。对某些代码而言，特别是像 COMSOL Multiphysics 这种最近才用于核行业的软件代码，最好的验证方法（同时也是 ORNL 打算针对 COMSOL Multiphysics 所采用的方法）就是生成一份独立的验证报告，用于说明许多与他们研究直接相关的仿真结果的有效性；或者，可以将确认工作作为正式核安全相关计算程序中的一环，由单独的程序负责控制及管理。

虽然符合验证要求比较简单，但如果没有合适的软件工

具，验证过程也可能非常耗时。DOE 要求团队提供一份报告。报告中需要包含一组从 COMSOL® 软件中选定的应用模型，并对比这些模型在 ORNL 的运行结果与 COMSOL Multiphysics 软件 App 库中自带配套文档中的结果。由于可能会选择多个应用模型，而且还要记录报告中输出的每个变量，所以需要大量的资源来完成验证。

Jim 表示“按照汇报要求，我们曾经需要花费一到三个月的时间来验证 COMSOL 的一个新版本，需要手动与 COMSOL 提供的文档资料比对多个仿真结果。”

⇒ 简化 SQA 流程

随着 COMSOL 中新增 App 开发器以及 Michael (Mike) W. Crowell 作为核安全与实验分析员加入 ORNL 团队，所有

这一切都发生了改变，他们看到了自动完成 SQA 程序的可能性。仿真专业人员可以使用 COMSOL Multiphysics 进行基于物理场的分析，然后借助 App 开发器为模型定制用户界面。这就意味着团队中的每个人都可以访问 COMSOL 模型，无需专业的 COMSOL 编码经验，也不需要向专业人员寻求帮助。除了能够轻松开发定制界面之外，仿真专业人员还可以利用由 Java[®] 代码编写的方法来拓展模型，执行定制命令，并与以前程序进行链接。而这正是 ORNL 团队的迫切需要的。

在验证步骤方面，研究人员需要演示软件已经正确安装

“自动报告不仅帮我们节省了大量时间，还提升了精度与可靠性。”

— JIM FREELS, ORNL 高级研究人员

在特定的计算机上，而且能按照 COMSOL Multiphysics 开发人员的预期运行并得到结果。Mike 在寻找一个解决方案，希望能帮助团队测试能否在使用不同操作系统和数学库的计算机上得到相同的仿真结果。“由于机器架构和库的差别，再加上机器精度的限制，我们并不要求软件内的结果与本地结果能够吻合到小数点后的最后一位，但希望结果能够足够接近。” Mike 解释说。差异的产生有许多原因，例如，求解器与网格算法在本地的创建与编译方式等都可能造成偏差，而这些偏差都将影响最终结果。

在 COMSOL 开发的“模型测试器”（App 开发器）正式发布前，Mike 使用 MATLAB[®] 定制了一款软件程序来完成自动验证流程，实现的方式类似于首先选择 COMSOL[®] 软件的 App 库中自带的一小组模型并在本地运行，然后提取并对比结果。他们在 COMSOL 用户年会 2015 波士顿站发表的论文就记录了这款程序的开发过程。Mike 开发的 MATLAB[®] 软件程序将对比模型内及 COMSOL 配套文档中的结果与在本地获得的结果，然后报告二者的差异，突出显示所有出界情况。借助 Mike 的新方法，ORNL 将验证所需的时间从数月减少至几天。

Jim 非常希望能与 COMSOL 和 DOE 项目中的其他设备供应商分享 Mike 的成果，这也促成了他与 COMSOL 公司首席技术官 Ed Fontes 的一次交流。Jim 希望 COMSOL 能开发一款 App 并加入 App 库，这样所有用户都能轻松验证 COMSOL Multiphysics 的安装。Ed 解释说，他们在开发 COMSOL Multiphysics 时都会进行类似的验证测试，每晚都会

测试数百个模型。他很乐意启动该项目，并表示“App 将允许用户运行一系列模型，对比如温度和电势等物理量的运行结果与产品文档（及 App 库）中的值，用户还将在测试完成后自动收到一份报告”。（见图 2）。

⇒ 自动报告解放生产力

用户可以根据 COMSOL Multiphysics 许可证运行 App 库中的模型，灵活选择他们希望加入安装测试的模型。仿真开始后，测试 App 将告诉用户哪些模型通过了测试，哪些未能通过，包括发生失效时的值，并会自动向用户提供一份报告。“通过/失败”的标准有缺省设定，但用户可以根据需求进行更改。用户也可以通过自己的模型来拓展测试，并为数值解输入自己的参考值。

“用户可以使用 App 与上次的安装结果对比，清楚了解最新安装中产品的各项升级带来的潜在影响。” Ed 说，“例如，如果 COMSOL 更改了网格算法或湍流模型，您将能查看更新对您自己的模型及 COMSOL App 库中的模型结果的影响。”

在对测试 App 的初级版本进行测试后，Mike 说：“我们能够在 24 小时内完成所有验证步骤。”

Jim 补充道：“自动报告不仅帮我们节省了大量时间，还提升了精度与可靠性。这使我们能将更多精力放在 HFIR 的燃料从高性能 HEU 到 LEU 的转换上。” ❖



上：橡树岭国家实验室的高通量同位素反应堆。下：ORNL 研究反应堆部门的核心 COMSOL 团队，从左到右：Christopher J. Hurt、Franklin G. Curtis、Prashant K. Jain、Michael W. Crowell、James D. Freels 和 Emilian L. Popov。