



从电子表单到多物理场仿真 App， ABB 持续推动变压器行业的发展

许多公司在开发新型变压器或改进现有型号时，需要制作各种样机并借助测试来降低变压器工作时发出的鸣扰，这会产生高额的费用成本。在 ABB，一个工程师团队正通过开发多物理场仿真与定制 App 来加深他们对变压器设计的理解。

作者 **LEXI CARVER**

不论是烧饭做菜还是给手机充电，我们每天的生活都离不开由电网为住宅、公司及学校等各类建筑提供的能源。这个复杂网络包括发电站、长距离电力传输高压线、为每户家庭及社区供电的配电线路，以及用于过电保护及控制相关的硬件。

这其中就包括用于增加及降低交流电输电线路中电压等级的电力变压器

(见图 1)。电压越高，功率传输时的损耗越低，所以高电压更适合长距离功率输送。但这种高压等级会给输电线的两端带来潜在的安全威胁，因此需要通过变压器来增加电源馈入点的电压，降低街区及建筑物周围的电压。

然而，变压器会发出噪声，人们在它附近会听到微弱的嗡嗡声。根据相关法规，设备的噪声级必须维持在安全范

围内。虽然我们无法制造出完全静音的设备，但可以通过优秀的产品设计来尽量降低这类噪声的影响。

总部位于瑞士苏黎世的 ABB 集团是全球最大的变压器制造商之一，公司正通过数值分析和计算 App 来预测和最小化变压器中的噪声等级。他们借助 COMSOL Multiphysics® 仿真软件和 App 开发器来运行虚拟设计检查、测试



图 1. 高压输电中使用的变压器。

各种配置，并通过基于模型开发的定制用户界面来部署仿真结果。

⇒降低来自多个源头的噪声

变压器的噪声通常有多个源头，例如变压器铁芯或冷却系统内辅助风扇和泵的振动。为了更好地降低噪声，每个噪声源都需要进行不同方式的单独处理。

ABB 变压器中包括一个金属铁芯、缠绕于金属铁芯各段的线圈绕组、用于保护这些元件的外壳或箱子，以及外壳内的绝缘油（见图 2 上）。当交流电通过其中一个线圈绕组时，会产生磁通量，并在相邻线圈中产生感应电流。电压的调节可以通过改变线圈匝数实现。

制造铁芯的钢是一种磁致伸缩材

料，这些方向交变的磁通量会造成机械应变，金属的快速膨胀与收缩产生振动。当这些振动通过绝缘油和用于固定内部铁芯的装夹点传递到外壳壁处时，会发出一种能被人耳捕捉到的嗡嗡声，即铁芯噪声（见图 2 下）。

除铁芯噪声外，线圈中的交流电还会在各个绕组内产生洛仑兹力，造成振动，即载荷噪声，并以机械能的形式传递到外壳。

由于存在多个噪声源，同时还涉及相互关联的电磁、声学 and 力学等因素，瑞典威斯特罗斯市（Västerås, Sweden）的 ABB 集团研发中心（ABB Corporate Research Center, ABB CRC）的工程师们只有充分理解了变压器的内部工作原理，才能优化变压器的设计，将鸣扰降

至最低。

⇒声学、力学和电磁效应的全耦合

“我们选择使用 COMSOL Multiphysics 进行研究，是因为它能够多个物理场轻松地耦合在一起。”ABB 集团研发中心的科学家 Mustafa Kavasoglu 说，“因为项目需要模拟电磁学、声学 and 力学，而 COMSOL® 支持在单一环境下求解这三个物理场，所以它是我们的最佳选择。”

由 ABB 集团研发中心的 Kavasoglu、首席科学家 Anders Daneryd 博士和首席工程师 Romain Haettel 博士组成的团队正在研究变压器声学。他们的目标是通过开发一系列的仿真与计算 App 来计算变压器铁芯和绕组（参见图 3 左）中

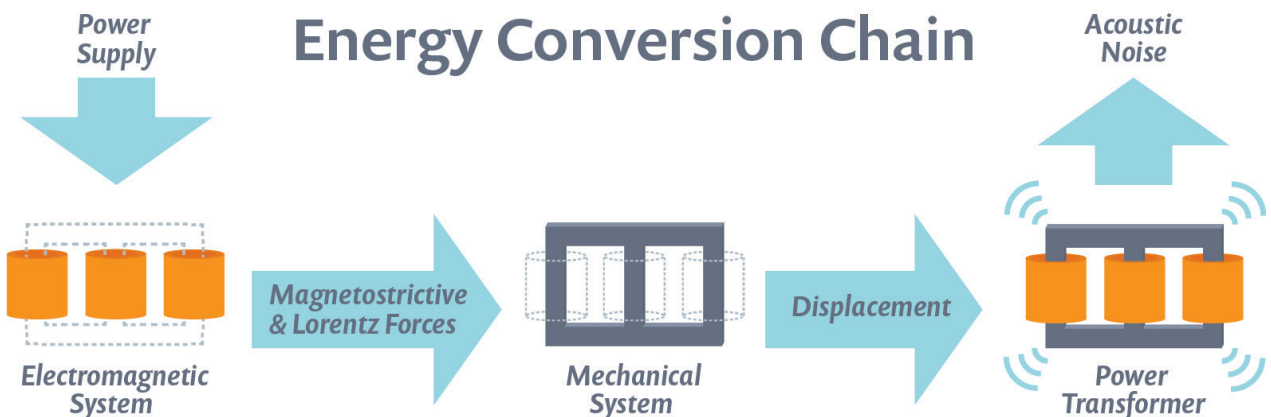
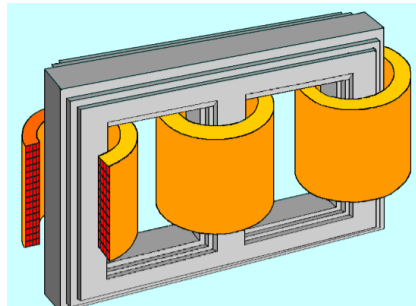


图 2. 左上: 三相变压器中器身装配的 CAD 模型, 绕组环绕铁心安装。右上: 在装有绝缘油的外壳中安装电力变压器的器身装配。下: 发出铁芯噪声及载荷噪声的能量转换链(铁芯的磁致伸缩和绕组中的洛伦兹力)。图注: Energy Conversion Chain - 能量转换链; Power Supply - 功率输入; Electromagnetic System - 电磁系统; Magnetostrictive & Lorentz Force - 磁致伸缩与洛伦兹力; Mechanical System - 机械系统; Displacement - 位移; Acoustic Noise - 噪声; Power Transformer - 电力变压器

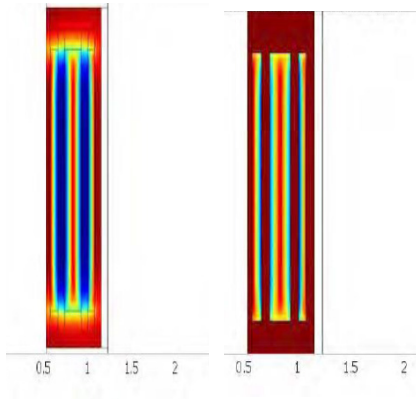


图 3. 仿真结果显示了变压器线圈绕组中的磁通密度(左)和洛伦兹力(右)。

产生的磁通量、绕组中的洛伦兹力(见图 3 右)、磁致伸缩应变引起的机械位移,以及声波传播通过外壳时产生的声压级。

他们与 ABB 变压器业务部进行了密切合作。为了满足业务需求与相关要求,项目时常需要借助知名电力变压器专家 Christoph Ploetner 博士的经验与专长。

在其中一个仿真项目中,他们模拟了铁芯在磁致伸缩影响下发出的噪声。团队首先通过电磁模型预测了由交流电感应出的磁场,然后分析了钢中的磁致伸缩应变。

他们的几何设定中包括钢制铁芯、绕组以及用于表征外壳的外部域。“我们从磁致伸缩的应变结果得到了位移,然后通过模态分析计算了不同频率下的谐振。”Kavasoglu 说(见图 4),“磁致伸缩应变很容易激励出谐振,并会放大

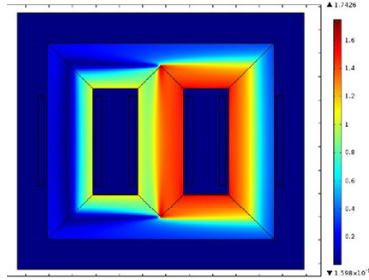


图 4. 左: COMSOL® 软件结果显示了钢制铁芯中的磁通密度大小。右: 铁芯的共振结果; 为清晰起见, 放大了变形部分。

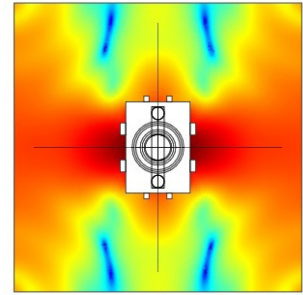
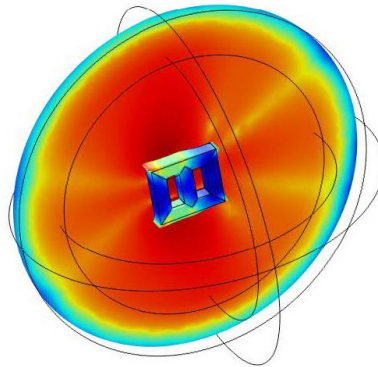
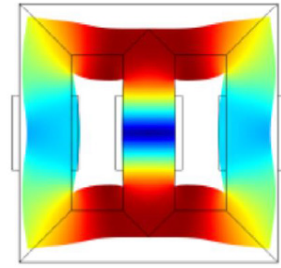


图 5. 铁芯(左)和变压器(右)周围声压场的声学分析结果。

这些频率下的振动。”

由此,他们将能够预测声音在绝缘油中的传波,并计算它在外壳中引发的振动,以此计算传到周围环境中的声辐射(见图 5)。

他们还模拟了造成载荷噪声的线圈绕组的位移,并确定了由此产生的声场在外壳壁造成的表面压力(见图 6)。

他们还通过参数化研究分析了设计参数(比如外壳厚度和材料属性)与产生的变压器鸣扰之间的复杂关系,据此调整了几何、铁芯、绕组和外壳的设定,希望能尽量降低噪声。

⇒ 在全公司推广仿真

集团研发中心的研究团队持续使用 COMSOL 软件加深他们的理解,并改进模型,还希望将自己的知识带给 ABB 集团的其他设计人员以及整个业务部门。他们利用 COMSOL Multiphysics 中的 App 开发器将多物理场模型转化为 App,并根据各部门的需求轻松地进行定制。

“我们还通过 COMSOL Server™ 许可证将用于测试的 App 分发给其他办公室,轻松实现共享。这种全球许可证非常实用;作为一家全球化公司,我们希望位于世界各地的用户都能从这些 App 中获益。”

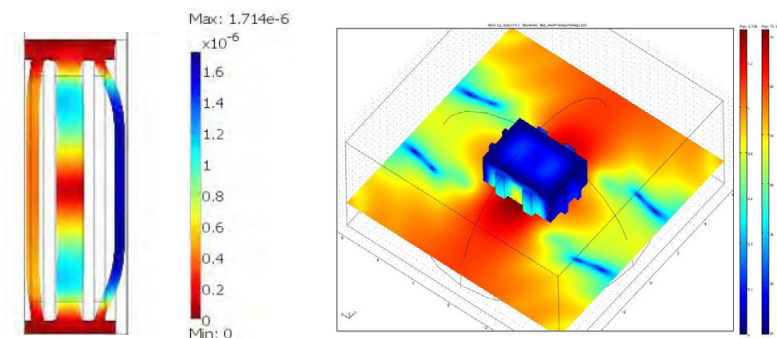


图 6. 左：仿真结果显示了绕组的位移。为清晰起见，放大了变形部分。右：结果显示了外壳外部的声压级及外壳壁的位移。

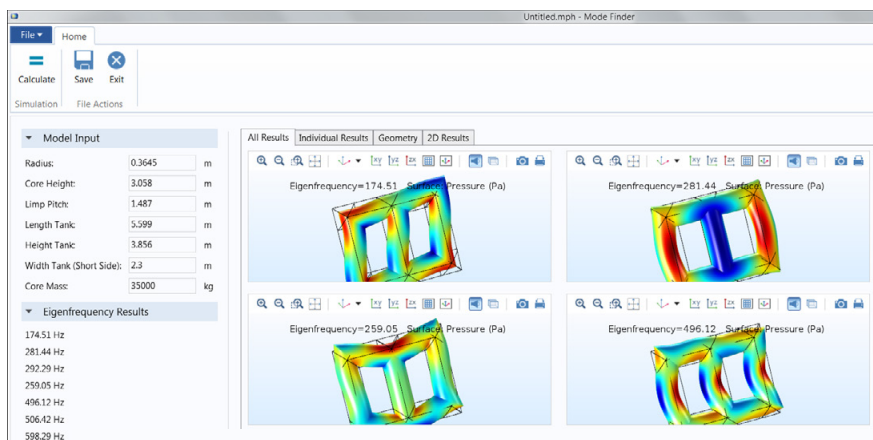


图 7. 用于计算变压器铁芯特征频率的首个仿真 App。左侧的选项卡栏为模型输入项；右侧将显示特征频率的计算结果。为清晰起见，放大了变形部分。

这些仿真 App 简化了设计人员和研发工程师的测试与验证工作。“一直以来，设计师们使用的设计工具都是基于统计数据和验证模型。我们通过部署仿真 App 弥补了这一不足。借助我们在 App 开发器中制作的用户界面，他们无需学习有限元理论也能独立运行有限元分析。” Haettel 解释说。

图 7 中的 App 用于计算变压器铁芯的特征频率，如果在可听阈内则意味着会造成噪声问题。App 中包括在 COMSOL® 软件中开发的物理场模型，以及在 App 开发器中由 Java® 代码定制开发的方法。

“我们的设计人员可以通过标准电子表单处理日常开发工作。但是在引入新设计或其他几何尺寸时，这一方法就会遇到问题，例如错误的输出结果表明噪声级数据还不够准确。如果还需要结合其他方法来降低变压器的整体噪声，那成本将变得很高。” Haettel 继续说。

“除了成本因素，还有时间方面的考虑。新的 App 工具集成了有限元代码的精度优势，从而使设计人员的工作更加简单高效。”

用户可以很方便地在定制 App 中查看由于特定几何、材料属性和其他设计参数组合造成的变压器鸣扰。“我们慎

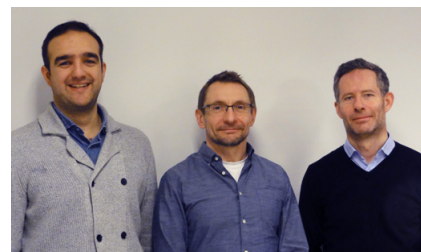
重地选出了允许用户访问的参数，主要是一些最重要的参数。” Kavasoglu 补充道。

鉴于 ABB 需要为多个工业应用领域设计变压器，这种灵活性将给他们的设计与虚拟测试带来极大的便利。“ABB 需要针对各行业的需求生产变压器。我们当前主要研究了电力公司中常用的、负责为整个城市输送和分配电力的大型交流电力变压器。”他解释说。

“不过，我们的工作可以适用于任何类型的变压器中，而且我们还可以根据收到的请求来修改 App，满足他们的具体需求。这也使我们能够轻松地进行其他研发工作。App 开发器简化了知识与技能的传递。”

“我们还通过 COMSOL Server™ 许可证将用于测试的 App 分发给其他办公室，轻松实现共享。这种全球许可证非常实用；作为一家全球化公司，我们希望位于世界各地的用户都能从这些 App 中获益。”仿真专家可以通过在本地安装的 COMSOL Server 管理并部署他们的 App，用户则能通过客户端或网络浏览器进行访问。

该团队目前正在努力开发另一个用来计算载荷噪声的 App。在业务部门中，该 App 将进一步简化繁琐的计算工作；与此同时，设计人员和销售工程师无需设置底层的精细模型就可以进行虚拟测试。这使得 ABB 能更快、更轻松地制造出全世界最好的变压器。❖



从左到右依次为 ABB CRC 的 Mustafa Kavasoglu、Romain Daneryd 和 Anders Haettel。