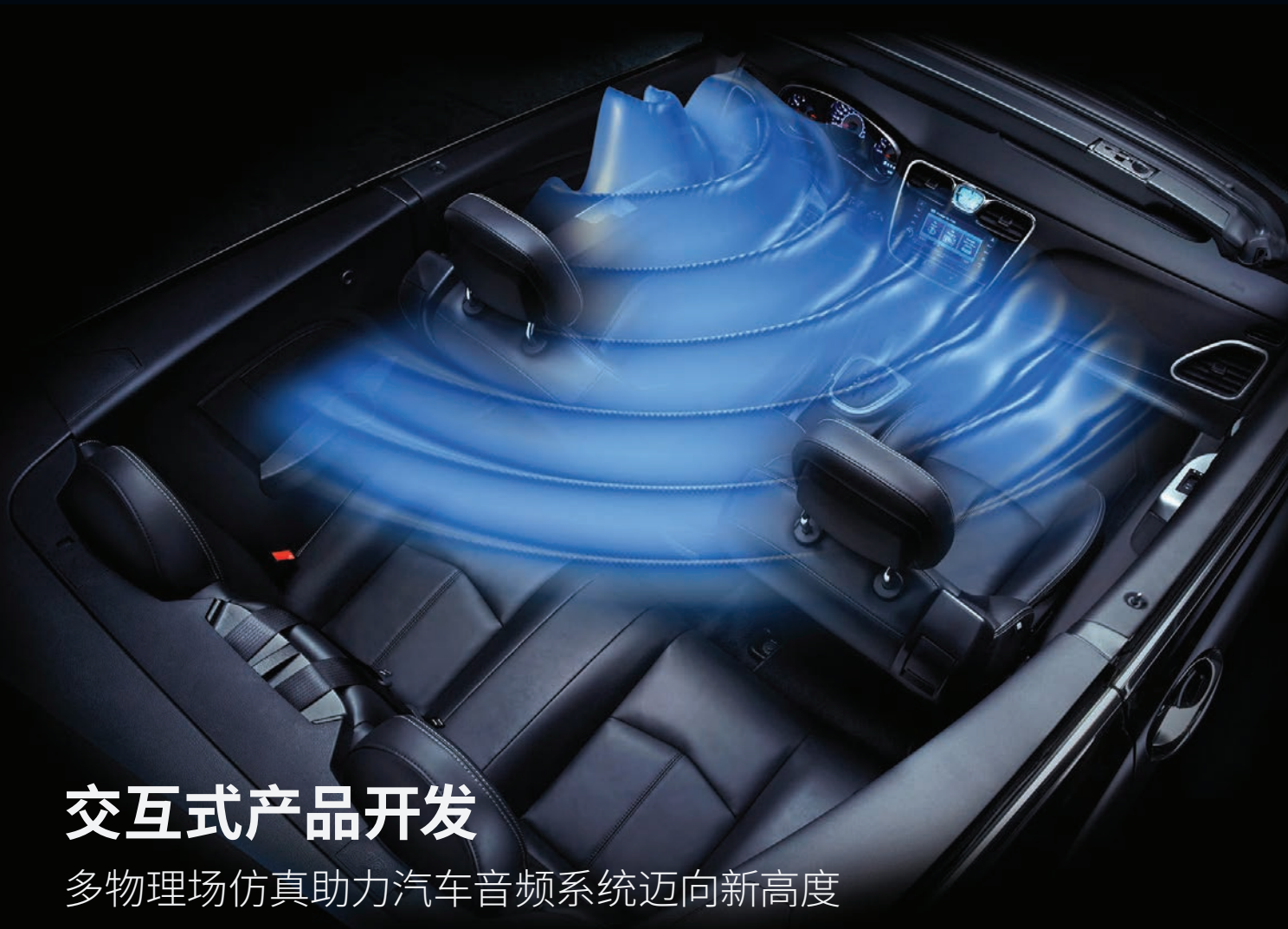


多物理场仿真

IEEE
SPECTRUM

2019年12月

COMSOL
赞助



交互式产品开发

多物理场仿真助力汽车音频系统迈向新高度

P 16

多物理场仿真照亮未来

作者 **MICHAEL FORSTER, IEEE 出版社常务董事**

多物理场仿真技术不仅可以优化产品设计,同时也引领着技术革新。在电气化动力系统设计,多物理场仿真技术被用于加速电动汽车的开发流程。德国大众汽车公司开发了一种有效的电动机建模方法,可以平衡电动机引擎组件的电磁和机械设计要求。电动机设计流程的优化推动了新型汽车技术——如数字化技术、自动驾驶技术和电驱动技术的发展。

依利诺伊工具制造公司是世界上最大的商业食品设备制造,该公司的资深射频系统工程师使用多物理场仿真软件,设计了一款能够快速、均匀加热食物的智能固态微波/对流微波炉。

多物理场仿真为工程师研究物理现象提供了一个全新的工具。哈曼公司的研究人员正在使用仿真工具设计用于豪华汽车的车载信息娱乐系统,并已经开始尝试开发基于虚拟现实技术的交互式购车体验系统。

弗吉尼亚联邦大学的一位教授使用仿真 App 向本科生讲授电磁学基本原理,并且已经考虑将虚拟现实和增强现实技术纳入新的教学计划中。

从开发环保的电磁技术到启迪未来的电气工程师,多物理场仿真正在帮助越来越多的公司和企业走向美好的未来。

最后,衷心的希望您喜欢本期 COMSOL 多物理场仿真特刊中的精彩案例。

祝您阅读愉快! ☺

封面图片:

豪华汽车中的扬声器声场可视化图像。图片由哈曼公司提供。



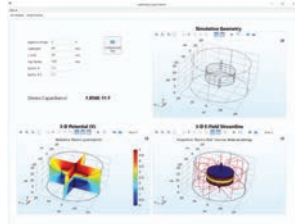
目录

3 仿真 App 加速电动汽车开发流程

— 大众汽车公司, 德国

6 ABB 公司使用多物理场仿真优化变压器和传感器设计

— ABB 公司, 美国



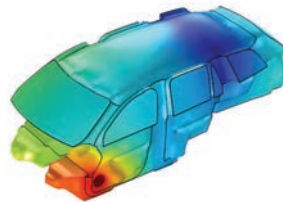
10 仿真App 在电磁学课程教学中的应用

— 弗吉尼亚联邦大学, 美国



13 多物理场仿真优化智能微波炉设计

— ITW 公司, 美国



16 仿真 App 助力汽车音频系统设计

— 哈曼公司, 法国

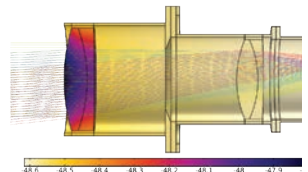
20 借助仿真探究布里渊光力学相互作用

— 坎皮纳斯大学/康宁公司, 巴西



22 大型电气设备性能的仿真优化

— 平高集团, 中国



26 光学系统的多物理场仿真

— COMSOL 公司, 美国



29 仿真优化同步加速器真空室设计

— RadiaSoft 公司/阿贡国家实验室, 美国

32 仿真推动蜂窝移动通信市场迈入 5G 时代

— Signal Microwave 公司, 美国

仿真 App 加速电动汽车开发流程

大众汽车公司通过创建和分发仿真 App 评估转子叠片的强度,加速了电动汽车的开发流程。

作者 THOMAS FORRISTER

随着消费者对环境的关注程度越来越高,电动汽车有望超越传统内燃机汽车成为新的交通工具。为了满足消费者日益增长的需求,电动汽车与内燃机的领军制造商们正在竭力合作开发电动和混合动力汽车,为电动汽车的发展铺平道路。大众汽车公司便是其中之一,其位于德国卡塞尔的工厂专门从事电动机的研发和生产,日生产 150 个电动机和 300 个混合动力电动机。

转子是电动机的基本组件。在电动机运行过程中,转子必须能够在变化的转速和扭矩下长期使用,因此必须经过耐久性测试。但是,评估转子叠片的强度极其耗时。于是,大众汽车使用 COMSOL Multiphysics® 软件创建了仿真 App,使转子的测试过程自动化,并在降低开发成本的同时,提高了产品质量。

» 平衡电磁和机械设计要求

2015 年,大众汽车开发了一套模块化系统——模块化电动工具包 (Modular Electrification Toolkit, MEB),用于优化电动汽车的设计并提高生产效率。MEB 考虑了后轮驱动

为主的全轮驱动系统的扭矩、功率和速度 (图 1)。此外,轴比、驱动单元、质量和轴距,以及高压驱动电池的设计和放置等其他设计要求,在整个 MEB 设计理念中也起着重要作用。尽管 MEB 有助于优化单个组件和整个系统,但设计人员必须仔细考虑如何平衡这些要求,尤其是涉及数字化、自动驾驶和电动驱动等新技术。

自电动机开发的最初阶段开始,大众汽车的设计、仿真和测试人员就一直保持密切合作。首先,仿真专家对电动机的性能和规格进行了考察,并研究如何通过仿真进行最优设计。例如,对电

动机进行建模以大幅减少影响因素的数量;分发基于多物理场仿真模型创建的仿真 App,使设计人员可以对不同的变量进行测试,并选择最佳的变量。这种合作形式非常重要并且有益于提高整个开发流程的效率。由于仿真无法涵盖所有现实问题,因此测试在研发过程中起着重要作用。此外,试验测试程序也有助于改善仿真模型。

“在电动机的开发过程中,必须满足众多要求。”大众汽车的组件研发仿真工程师 Steffen Rothe 博士解释道,“一方面,电动机必须满足扭矩和功率的电气要求;另一方面,转子必须在承

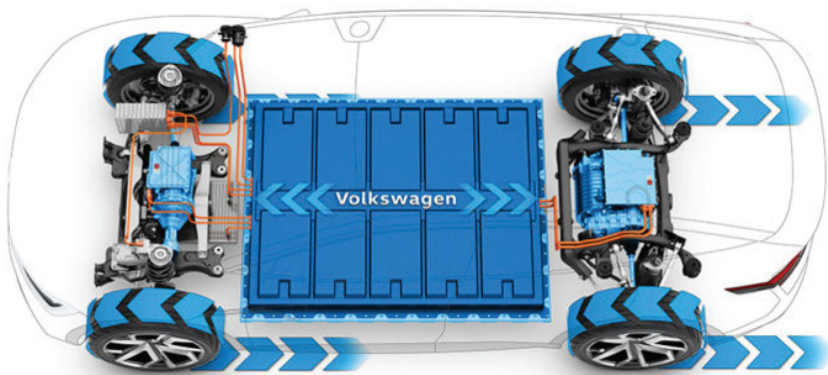


图 1 MEB 示意图,全轮驱动器(左侧,车辆前部)和主驱动器(右侧,车辆后部)。

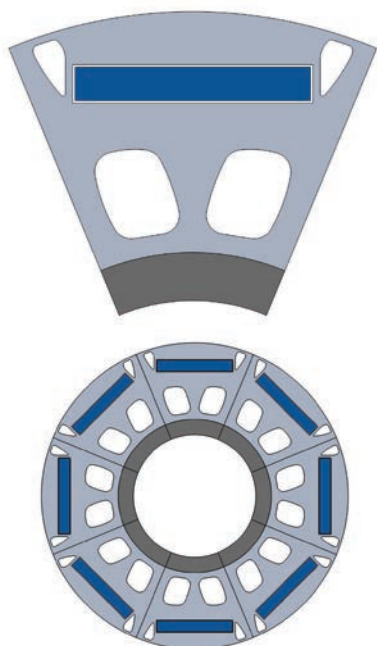


图2 转子平板、轴和磁体。

受以离心力为主的载荷时具有足够的耐久性。”平衡电磁与机械设计的双重要求具有一定的挑战性,因为它们的需求并不总是一致的。例如,对于电磁要求,最好使用薄的网状结构;但对于机械耐久性而言,较厚的结构则是优选。因此,应该确保在电动机开发过程中尽早考虑这些需求,一种有效的方法是模拟满足需求的所有载荷工况。Rothe 表示:“仿真在加速开发过程中起着重要作用。”

“许多工业仿真程序都被设计为‘黑匣子’,而 COMSOL Multiphysics® 软件的透明度是独一无二的。它支持用户查看和修改被求解的方程,甚至添加自己的方程。”Rothe 说。此外,软件从一开始就被设计为多物理场工具,使用户可以同时模拟不同的物理问题。因

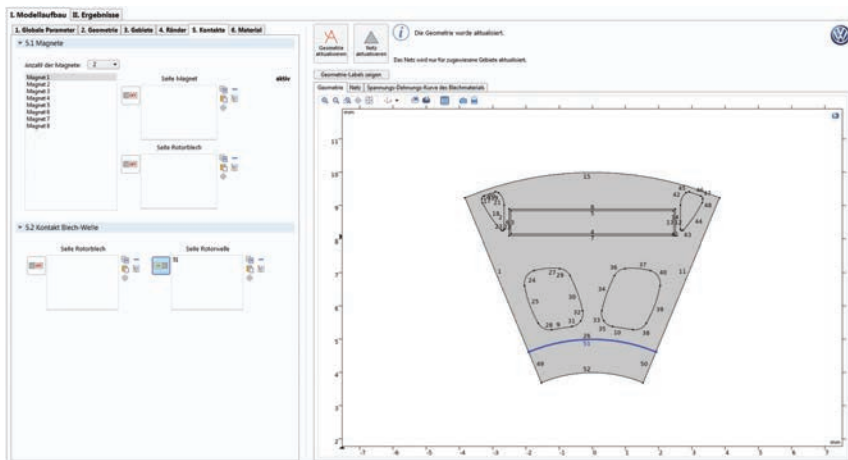


图3 仿真 App 用户界面示例。

此,用户可以使用软件耦合不同的物理场进行创新性研究。但是,即使对于仿真专家而言,分析此类复杂的物理问题也极具挑战。因此,团队需要一种能与同事沟通,并可供非机械仿真领域的专业人士测试特定参数的工具。设计人员通过使用 App 开发器来满足这些需求。App 开发器是 COMSOL Multiphysics® 软件中的内置工具,可以创建用于预测转子中应力分布的仿真 App。

» 仿真 App 提高电动汽车生产效率

在为同事设计一种用于评估转子叠片的强度和耐久性的仿真 App 时,仿真专家 Marie Hermanns 和 Steffen

Rothe 考虑了以下几个因素:哪些部分可以自动运行,哪些参数可变,以及仿真 App 应显示哪些结果。

对于一个典型转子模型的设置(图2),仿真专家认为仿真 App 应能自动运行载荷测试,包括干扰、温度和运行速度。其他部门的同事均能受益于这一设计,并能自行更改参数。这些可变参数包括:几何形状、面积、干扰、接触件、活性磁体的数量以及材料属性。通过考虑上述因素,Hermanns 为仿真 App 开发了一个直观的用户界面(图3),使其他同事可自由执行他们所需的计算。

“我们的想法是为同事创建一个仿真 App,实现运用基准程序对不同的设计进行简便、快速地测试。”Hermanns

“许多工业仿真程序被设计为‘黑匣子’,而 COMSOL Multiphysics® 的透明度是独一无二的。它允许用户查看和修改被求解的方程,甚至可以添加自己的方程。”

——STEFFEN ROTHE 博士,大众汽车公司

说道,“此外,对于特定问题,用户不必了解仿真工作的具体原理,就可以使用直观的用户界面创建一个工具。”

» 满足公司和客户需求的标准化开发程序

除了使大众汽车各部门之间的开发

过程实现自动化外,专业的仿真 App 还可以帮助工程师将转子叠片的测试程序标准化。

仿真 App 缩短了执行常规仿真操作(如设置边界条件、材料属性和载荷)所需的时间,并将这些操作标准化后集成在一个用户界面。它的另一个优点是,可以自动生成报告(其中包含转子叠片的额定强度等信息),便于团队之间以标准化的方

式进行交流(图 4)。

在电动机的开发过程中,使用仿真 App 对转子叠片进行应力分析,可以帮助大众汽车的工程师节省时间和资金。仿真 App 可以自动运行冗长的建模过程,并输出标准化模型和结果。这不仅提高了产品质量,还缩短了电动汽车从模型到概念车再到商业化电动汽车的开发时间。🕒

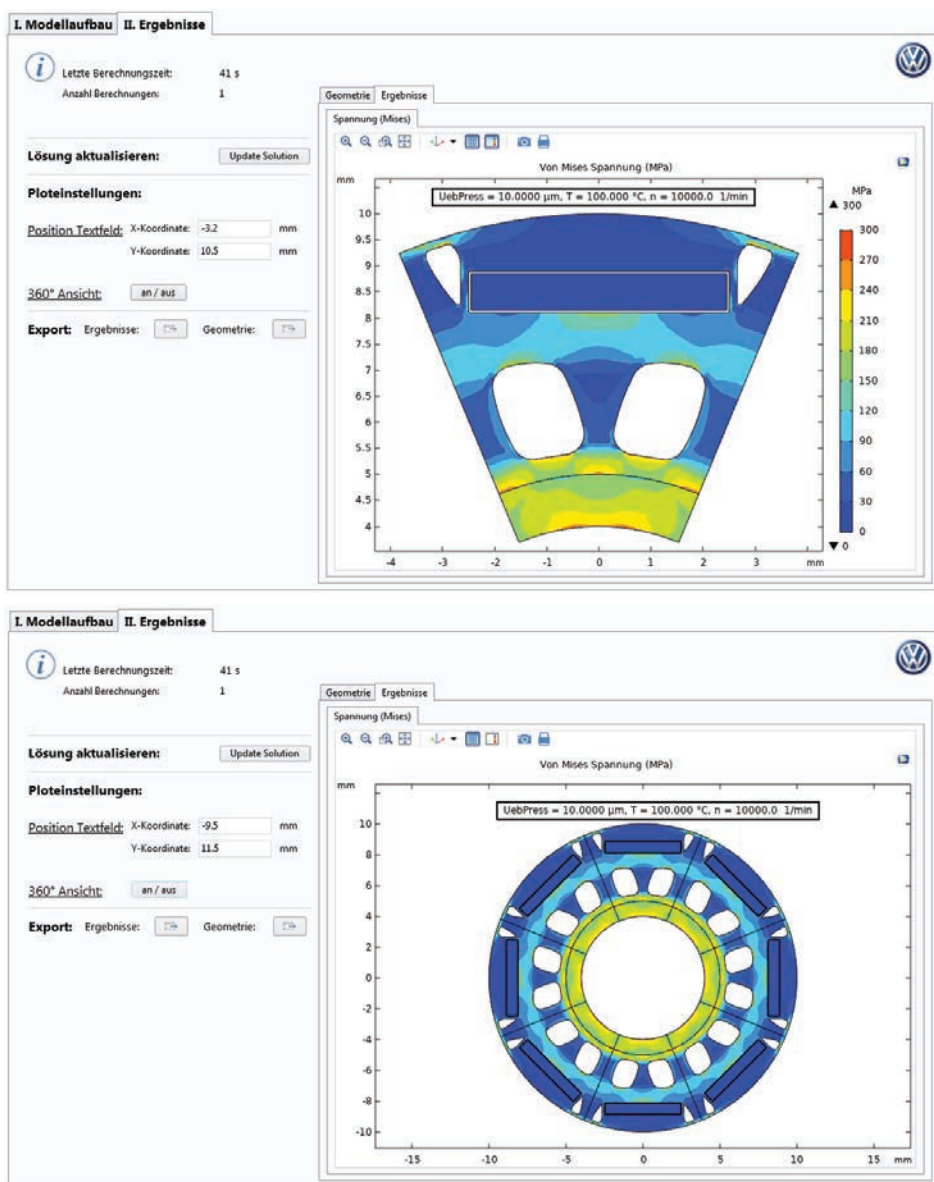


图 4 转子的标准化应力结果。



仿真工程师 Marie Hermanns (上); 仿真工程师 Steffen Rothe(下)。

ABB 公司使用多物理场仿真优化变压器和传感器设计

为了保障电网免受系统故障的影响，ABB 公司通过多物理场仿真设计了可以承受快速瞬态过电压，及可用于地下电力系统的潜水型钳式传感器。

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

停电有时会持续数小时、数天、数周甚至数月，无论停电时间持续多久，都可能会令人感到沮丧或造成混乱。在极端炎热或寒冷的天气，停电甚至会带来危险。为了保障电网的稳定性、安全性和财务可行性，ABB 公司使用多物理场仿真和仿真 App 对变压器和传感器设计进行优化。

» 互感器的多物理场仿真设计

仪用变压器 (instrument transformers) 又称互感器，是一种专业的高精度变压器，通过隔离、转换或降低高电压和大电流，最大程度地提高系统的安全性和可用性。互感器由连接高电压或大电流的初级线圈，和连接低电压或小电流的次级线圈组成。由互感器构成的仪表和继电器可用于监测、保护和控制电力系统。

ABB 基于罗氏线圈 (Rogowski coil) 原理设计了一款电流传感器 (图 1)。罗氏线圈由均匀缠绕在非磁性

铁芯上的线圈组成，其输出电压与电流的导数成正比。在中等电压情况下，传感器使用电阻分压器和电容分压器测量电压。

近年来，互感器和传感器行业发展迅速。基于标准技术制造的传统互感器已有一百多年的历史，主要用于仪表和继电器。传统互感器由一个铁磁回路组成，能够将电力从初级线圈

传输到次级线圈，输出电流为 1~5 A，输出电压为 120~240 V。采用先进技术制造的智能电子设备仅出现了二十年。与传统的由铁磁材料制成的互感器不同，新型互感器由固态元件组成，由于其无法将电力从初级

线圈传输到次级线圈，因此能量输出较低。新型互感器 (如线型变压器) 适用于各种室内和户外环境 (例如空气或真空)。

ABB 的研发工程师 Nirmal Paudel 表示：“智能电子设备使用更加安全、用途更加广泛。它对各种输入信号都具有线性响应，并且与当今的电子设备和用户操作习惯相匹配”。

» 互感器的多物理场仿真设计

设计互感器时，必须考虑多物理场，这是设计的关键。一个成功的互感器设计应该包含焦耳热和感应加热、电感和电容耦合、磁饱和以及磁致伸缩等现象，同时还需要考虑流体流动、对流冷却、热膨胀、外部载荷和电路、噪声与振动，以及集肤效应等现象 (图 2)。

为了解决多物理场耦合问题，ABB 公司使用了 COMSOL Multiphysics® 软件进行模拟。他们模拟了在基本脉



图 1 基于罗氏线圈原理制作的传感器。

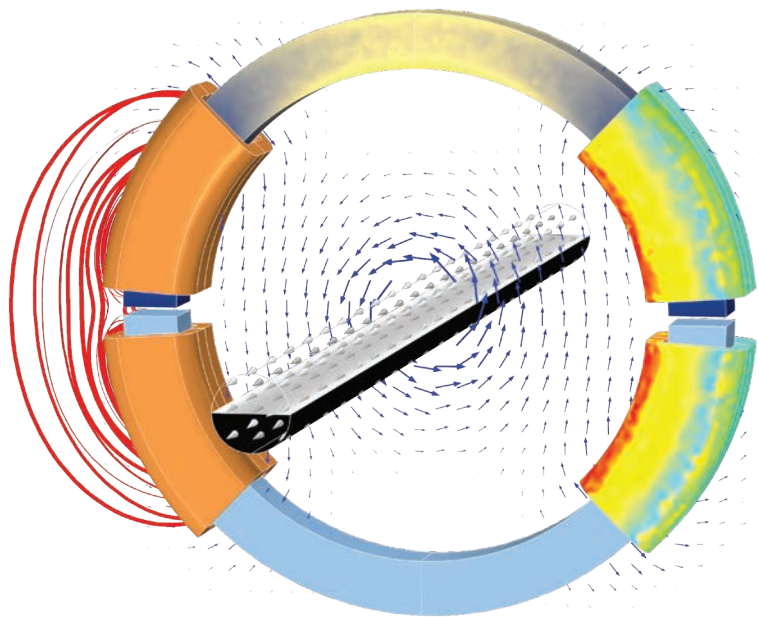


图2 互感器仿真设计中的多物理场效应。

冲水平 (basic impulse level) 下, 由环氧树脂铸件的空隙影响的互感器电场。根据模拟结果, 研究人员可以了解绝缘层和介电材料对设备的防护作用。

COMSOL 软件还可以执行热分析。如对于一个线性串联电压互感器,

通过仿真可以计算出其初级线圈和次级线圈中的磁芯损耗和电阻损耗。另一个实例是计算互感器外部边界上的热通量和底板上的固定温度。通过仿真设计, 不仅能够获取互感器的温度变化, 还能深入了解环氧树脂的热固化过程及其在模具中的流动。第三个实例

是结构分析。ABB 的团队通过仿真的方法计算了结构应力分布以优化互感器的几何结构 (图 3)。他们还考虑了设备和组件的应力和位移, 以便在 3D 打印测试 (或批量生产) 之前对原型进行优化。建模不仅有助于提前考查设备的性能, 还能确定设备结构的完整性。

» 瞬态现象的快速仿真

在例如真空断路器之类包含开关的电网设备中, 瞬态现象是需要考虑的重要因素。当开合引起瞬态现象时, 会给绝缘系统造成压力, 并在变压器的初级线圈中引起内部谐振。当瞬态过电压的分布变得高度非线性时, 会导致内部故障。由于新电网发电、载荷增加、线路特性以及开合过程, 可再生能源 (如风能) 附近的快速瞬态过电压 (very fast transient overvoltage, VFTO) 现象的发生频率会更高。VFTO 曲线的陡度 (即过电压分布的速度) 可以高达 $3 \text{ MV}/\mu\text{s}$, 比闪电还要快 (通常突变

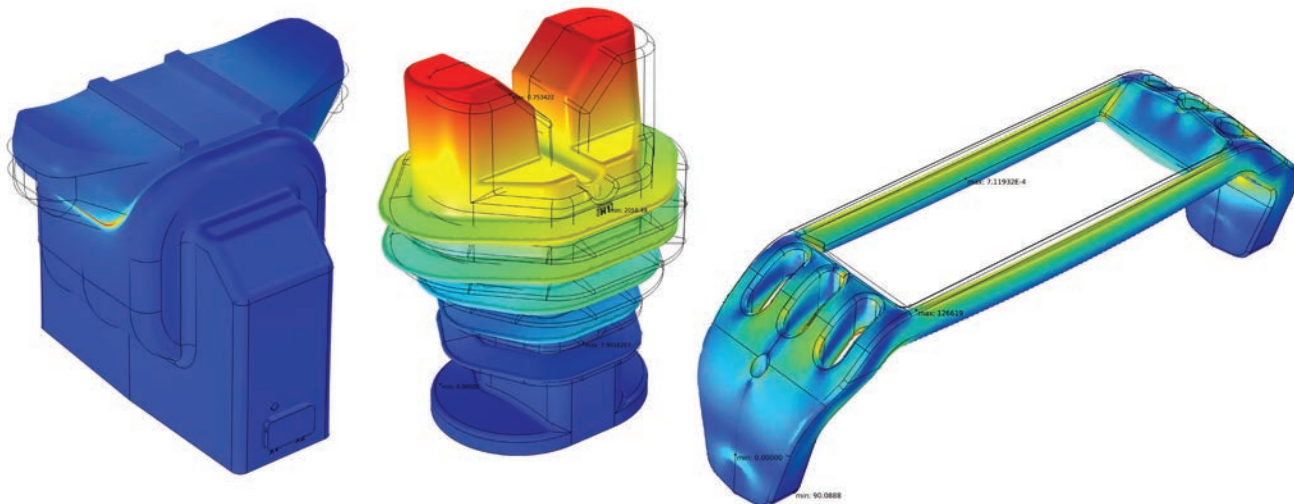


图3 使用结构模拟优化互感器的几何形状。

会使绝缘系统崩溃)。

设计能够承受过高 VFTO 的传感器,需要在高频电压下对绕组进行大量的建模工作。而以前,几乎没有适合此类建模的软件。直到最近,ABB 公司与位于拉珀斯维尔的应用科学大学 (Hochschule für Technik) 合作,利用 COMSOL 软件对上述过程进行了模拟,并分析了互感器中电压的分布。他们发现新型设计和新的干燥绝缘材料可以减少 VFTO 对互感器的破坏。

» 钳式电流传感器的仿真设计

钳式结构是互感器设计中的一个重要特性。钳式互感器(传感器)可以进行电网维护而不受任何干扰。ABB 正在着手设计一种钳式电流传感器,用于高精度的电流测量。该互感器的转换过程由其他设备完成,并且通过智能电子设备来识别信号以评估转换需求。它具有防水功能,能浸入水中,并可以在地下使用(地下电缆已经成为行业标准,因为它们受到强风或恶劣天气的影响较小,尤其是在城市中)。钳式传感器的设计包括形状、尺寸、质量、线圈匝数、铁芯形状和铁芯尺寸等,因此具有一定的挑战(图 4)。此外,还存

“当钳式电流传感器等设备在任何条件下都能运行时,每个人都将受益。”

——NIRMAL PAUDEL, ABB 公司

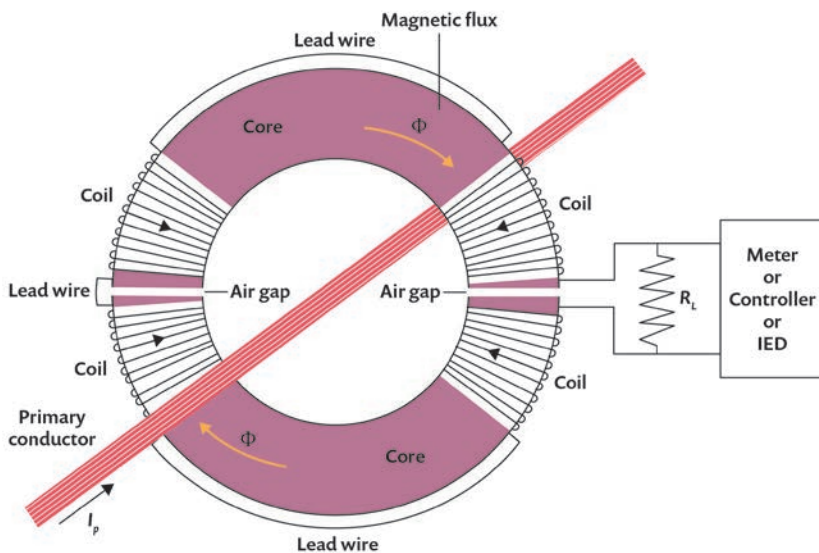


图 4 钳式电流传感器仿真模型。

图注:Coil - 线圈; Lead wire - 导线; Primary conductor - 初级导体; Meter or Controller or IED - 仪表、控制器或 IED; Magnetic flux - 磁通量; Core - 铁芯; Air gap - 气隙。

在电流串扰的风险,具体取决于设备的配置。最后,互感器在进行生产和使用测试之前其设计需要符合行业标准。“在实验室测试之前,互感器的设计必须满足各种 IEEE 和智能电子设备标准。” Paudel 说道。

为了在构建原型样机之前就能对钳式电流传感器进行优化,ABB 团队再次借助于 COMSOL 软件。Paudel 使用软件已经很长时间,并很喜欢其“容易使用的多种物理场接口,以及可以轻松耦合各种物理场”的特点。COMSOL 软件还内置了安培定律和麦克斯韦方程,可用于求解频域中的磁场(图 5)。由于线圈具有几何对称性,因此只需对线圈的 1/4 几何结构进行计算,以节省时间、精力和计算资源。建立一个特殊的线圈模型,需要将初级线圈

设置为实心导体,次级线圈设置为均匀缠绕的线圈;将磁场的切向分量和表面电流密度为零的区域作为理想磁导体的内部边界条件;将外部边界设置为磁绝缘体。软件内置的求解功能可以帮助团队轻松调整实心导体与均质导体,以及实心导体与电线之间的设置。

» 仿真 App 减少设计时间

在互感器设计中,由于非线性磁化曲线(B-H 曲线,直流磁化)和等效 H-B 曲线之间的转换通常比较耗时,因此,ABB 团队使用了 COMSOL 软件案例库中的仿真 App 来执行这些计算。他们在仿真 App 中找到等效 H-B 曲线后,再使用该数值对钳式电流传感器的磁芯进行了建模。仿真结果表明,磁通密度的降低导致整个磁芯的磁导

率几乎是线性的。因此, 研究小组认为应使用均质的各向异性电导率和磁导率。

通过观察磁通量和电流密度的仿真结果, ABB 团队发现他们设计的传感器的磁通量非常小, 适合测量中等电压。此外, 该团队还发现了一些有趣的现象。当次级线圈上的匝数增加时, 断路电压也会增加, 这与他们之前的一项研究结果吻合 (电压从 130 V 增至 196 V)。但是, 当次级线圈连接载荷时, 电压并不总是增加, 有时甚至会降低。

ABB 公司的最终设计目标是对钳式电流传感器设计查看不同配置下的三相串扰。他们发现串扰取决于次级线圈与初级线圈之间的距离。

» 设计流程与最终产品的优化

ABB 公司最终设计的潜水型钳式传感器最终达到了 IEEE 和智能电子设备的要求 (图 6)。当被问及他们未来的计划时, Paudel 表示, 他的团队正在致力于开发能推进 VFTO 和互感器分析的新工具, 目标是能将分析时间从数周缩短至数天。可以借助 MATLAB®, 也可以通过 LiveLink™ for MATLAB® 接口与 COMSOL® 软件进行连接。他们最终的研究结果与最初的计划一致, 新工具的使用优化了 ABB 公司的工作流程和设计过程。目前, 他们正在努力优化该传感器以增加电网的适用性。当钳式电流传感器等设备可以在任何条件下运行时, 正如 Paudel 所说, “人人都将受益”。

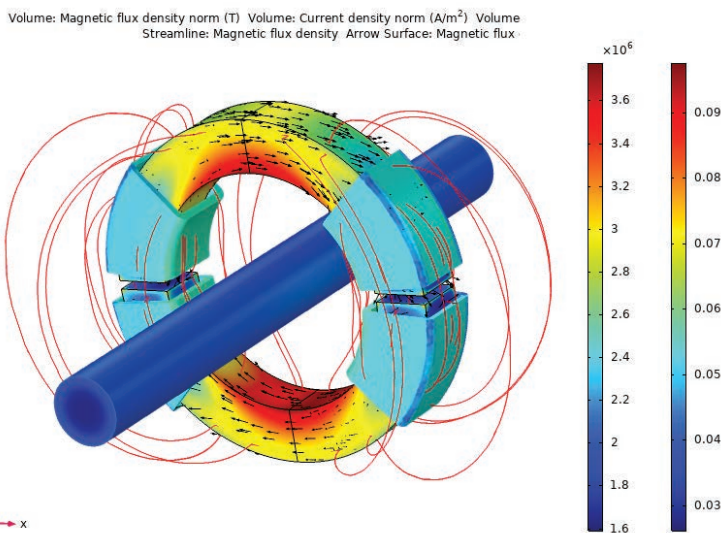


图 5 钳式传感器的磁通量和电流密度仿真结果。

“我喜欢 COMSOL 的易用性, 它在同一个界面集成了多个物理场接口, 可以轻松耦合多种物理场。”

— NIRMAL PAUDEL, ABB公司



图 6 潜水型钳式传感器。



ABB 团队, 从左至右: Vivek Siddharth, Steve Shaw, David Raschka 和 Nirmal Paudel。

仿真 App 在电磁学课程教学中的应用

弗吉尼亚联邦大学电气工程专业的学生通过仿真 App 深入理解电磁学原理, 获得了更好的学习体验和成就。

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

对于 Nate Kinsey 而言, 他在大学本科刚开始学习电磁学课程的经历, 是一段痛苦的回忆。“不少人仍记得他们学习电磁学课程的深刻体会, 如果不付出巨大的努力, 就无法理解其中的奥秘, 但理解之后会豁然开朗。” 他说道。然而, 这段经历并没有让 Kinsey 感到灰心。他选择继续在电气工程领域深造, 攻读了密苏里大学 (University of Missouri) 的硕士学位和普渡大学 (Purdue University) 的博士学位。目前, 他在弗吉尼亚联邦大学 (Virginia Commonwealth University, VCU) 教学, 同时进行集成光子学和非线性光学方面的研究工作。

Kinsey 第一次学习电磁学课程的艰难经历, 促使他选择仿真软件为学生授课。他认为, 要理解如此高难度的内容, 关键是要将问题可视化, 使学生获得直观的认识。然而, 这并非易事。

» 三维仿真视图加深理解电磁学原理

对于初学者而言, 由于电磁学包含了公式、三维矢量计算等抽象内容, 因此学习过程极具挑战性。许多学生深陷于理解复杂的数学公式和方程式, 而对于实际要解决的问题却没有清晰的认知。Kinsey 认为, 清晰的认知是学习电磁学课程的关键。

Kinsey 发现, 当代学生正努力在自己的脑海中创建一个关于物体或物理问题的图像。这是被新技术包围的新一代学

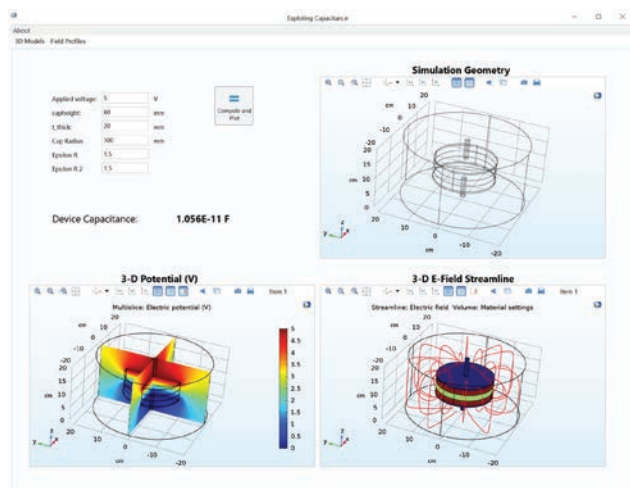


图 1 一款帮助学生学习电容器边缘场效应的仿真 App。

图注: Device Capacitance - 设备电容值; Simulation Geometry - 模拟几何结构; 3-D Potential - 电势三维图; 3-D E-Field Streamline - 电场线三维视图。

生最擅长的事, 即一旦在大脑中留下直观形象, 他们就可以回忆起相关内容。因此, 他们需要借助可视化图像来理解问题。

在电磁学领域, 由于电磁波看不见、摸不着, 因此学生对于手机或信号塔周围电磁场的实际情况了解甚少。而水波和声波直观可见, 因此, Kinsey 利用它们来解释电磁波, 从而帮助学生

理解数学公式所描述的物理现象。然而, 这些波也不能准确描述三维的电磁波。Kinsey 解释说: “学生需要三维视图才能看到真实存在的电磁现象, 如偶极子周围的磁场。” 他在黑板上画出了电磁场的原理绘图 (例如偶极子周围的场强分布类似于圆形或八字形, 具体取决于观察的角度), 然而黑板绘图仅能做到这些。Kinsey

“COMSOL 软件能使电磁场可视化, 能对场进行旋转、缩放及互动。例如, 可以观察偶极子周围的电场线如何分布, 而黑板上的绘图则很难准确描述这一现象。”

——NATE KINSEY, 弗吉尼亚联邦大学

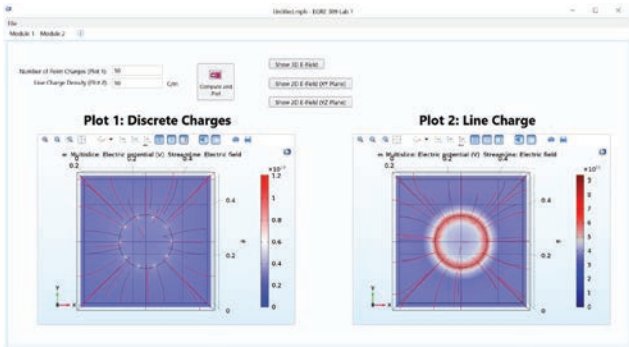


图2 一款帮助学生计算独立和连续电荷的仿真 App。
图注: Discrete Charges - 独立电荷; Line Charge - 连续电荷。

说：“有些学生能够理解，而有些学生仍很挣扎。”仿真工作恰好能解决这个问题。“COMSOL Multiphysics® 软件能使电磁场可视化，并能对场进行旋转、缩放及互动。例如，通过三维仿真视图可以观察偶极子周围的电场线分布，而黑板上的绘图则很难准确描述这一现象。”Kinsey 说道。

» 仿真 App 帮助学生学习电磁学课程

尽管 Nate Kinsey 在电磁学理论方面有深厚的造诣，但

他仍认为试验和使用仿真技术可以显著提升课程教学效果。2017 年，他重新设计了 VCU 的电气工程课程，以帮助 学生深入理解教学内容。

Kinsey 在课程表中添加了 COMSOL® 软件内置的仿真 App。“通过仿真 App 学生可以自行观察物理现象，并进行思考。”他说道。由于在课程中已经安排了大量的学习资料，因此 Kinsey 不再为学生增加学习仿真软件的任务。班级助教将他创建的电磁学基本模型封装成一个仿真 App，并将其上传至学校的 COMSOL Server™ 上，这样学生就

可以通过网页浏览器自行访问和运行该仿真 App。Kinsey 说：“我们设置了 5~7 个参数供学生试验，既能调动他们的兴趣，又不会使他们感到繁琐（图 1~图 3）。”此外，仿真内容是经过精心设计的，如果对过程规定过多或给予过多指导，会限制学生的批判性思维能力。为此，他们向学生分发了一个仿真 App，并设置了一些开放性问题，例如“使用该仿真 App，模拟一个以 $1/r^2$ 的速率下降的球场周围的电场”（图 4~图 5）。他解释道，不告知学生特定的数值或参数而让他们自己思考，如“我还需要测量什么？哪些参数需要清除？”如果参数设置错误或找不到所需的信息，他们必须反复尝试并从错误中成长，这将是一次很好的锻炼。

Kinsey 将他的电气工程课程设计为一个为期两周的，由仿真实验和实测操作相结合的循环交替过程，并通过学生演讲和详述过程的方式来强化教学效果。第一周，学生通过演讲和数值仿真来探讨关键主题；第二周，通过动手做实验，来验证数值仿真的结果。最后，

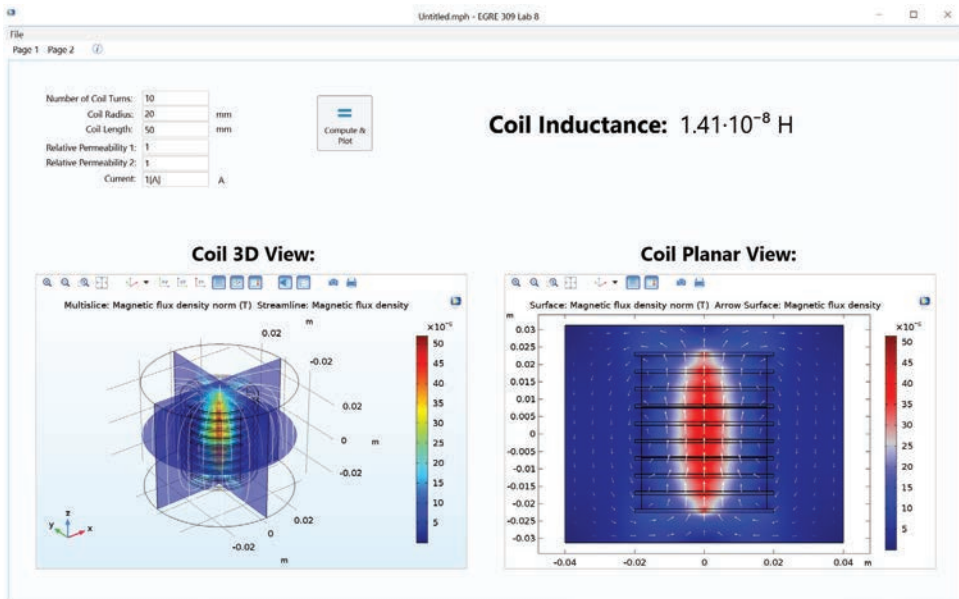


图3 一款用于计算线圈电感和边缘场效应的仿真 App，通过该仿真 App 可以调整线圈几何形状和设置参数。
图注: Coil Inductance - 线圈电感; Coil 3D View - 线圈三维视图; Coil Planar View - 线圈二维视图。

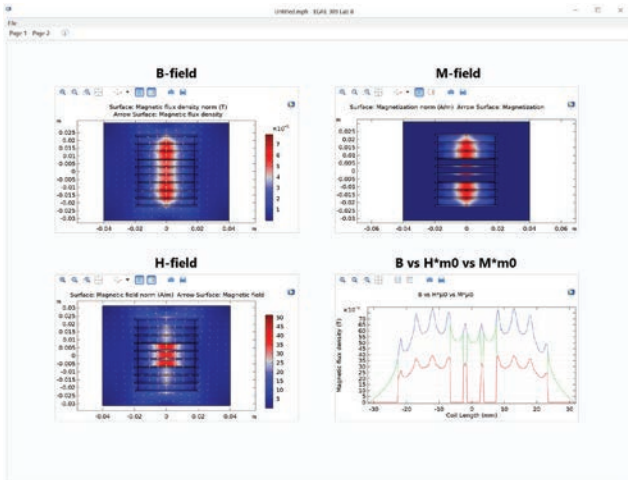


图 4 使用仿真 App 计算磁场和磁化强度的模拟结果。

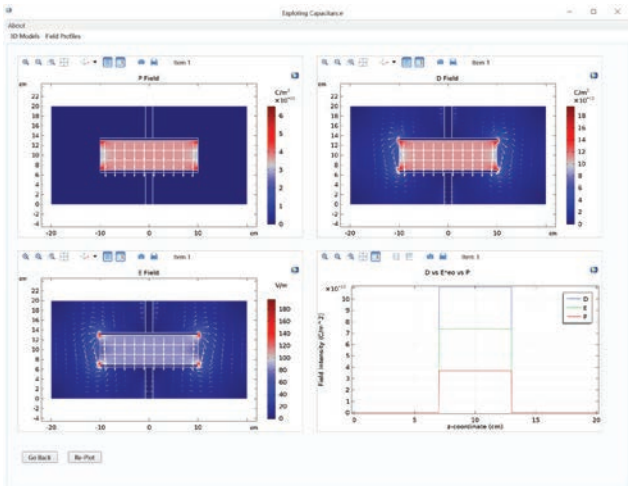


图 5 使用仿真 App 计算介质中电场分布的模拟结果。

通过比较实际测量值与数值模拟值的结果,讨论实际值与模拟值之间的差异并分析原因。

与任何教育机构的改革一样,仿真 App 的正常运行需要时间来不断调整。例如,在课程设计初期, Kinsey

致力于探讨如何合理设置自学任务的难度和自由度。同时,一些学生发现他们的模拟需要耗费较长的时间。Kinsey 认为这是一个很好的学习机会,因为可以使生思考如何平衡仿真的精度和速度,这对未来的工程师

培养很有帮助。

» 培养新一代电气工程师

Nate Kinsey 希望他的课程可以达到三个培养目标。首先,他希望能够培养学生对电荷之间相互作用的直觉,使他们不会因为问题变得复杂而气馁;“电磁学很容易令人费解,” Kinsey 说道,“实际上,你只需要寻找电荷之间的作用力就能将问题化繁为简,然而这个过程既简单又困难。”

其次, Kinsey 希望他的学生毕业后,能够成为具有批判性思维、并能解决实际问题的人。因此,学生需要理解电磁理论而不是死记硬背公式。例如,他不希望学生只会背诵高斯定律,而是希望他们能够进行自我反思:“高斯定律要表达什么内容,它可以解决什么问题”。

最后, Kinsey 希望学生可以领悟更高层次的电磁学内容,例如数学和物理是如何融合的。一名学生可能会求解线积分,却不会计算 A 点到 B 点的电位差,即使这两个问题的求解过程在本质上是相同的。因此,他希望学生能够跨越“复制粘贴式”的思维习惯,将数

学公式作为工具使用。“这就像学习如何使用锤子一样,” Kinsey 说,“首先,你需要先练习钉钉子,但最终你必须能够超越这一阶段,创造出新的东西。”

» VCU 电磁学课程教学的未来

目前, Nate Kinsey 正在寻找新的、更好的方法以使能够更轻松的学习。他希望有朝一日能将虚拟现实或增强现实 (VR/AR) 技术纳入他的课程教学中。AR/VR 技术能够模拟真实的工程场景,使学生沉浸于虚拟的电磁场、电容器和电介质中,深入体验物理现象并理解物理问题。Kinsey 说:“如何让这些新兴技术在教学中发挥作用,以及如何与仿真相结合是未来教学的研究方向。”



Nate Kinsey, 助理教授, 电气与计算机工程学院, 弗吉尼亚联邦大学。

多物理场仿真优化智能微波炉设计

ITW 的工程师使用多物理场仿真及仿真 App 来优化智能微波炉设计。固态微波 / 对流加热技术使厨师能够更快、更均匀地烹饪食物。

作者 THOMAS FORRISTER

连接性是实现电子设备“智能化”的关键因素。目前,用户可以轻松地通过蓝牙、无线网络、4G LTE 或 5G 技术,将手机或平板与电脑无缝连接。此外,电子设备的计算能力也是加速其智能化的另一个重要因素。人工智能设备可以使人们的日常生活实现自动化,并且节约能源。大多数智能家居产品已具有多种功能,如机器人吸尘器还可以定时调节照明和采暖。

目前,冰箱、洗碗机和微波炉等智能厨用电器已成为人们日常生活的一部分,并在专业厨房中占有一席之地。美国伊利诺伊工具制造公司 (Illinois Tool Works, ITW) 食品设备部是世界上最大的商业食品设备制造商。ITW 设计的专业智能厨用设备,改变了厨师的烹饪方式,并能帮助他们管理服务时间和定制菜单。

» 利用固态技术控制微波

从制冷机到保温设备, ITW 制造各种工业电器产品,并通过使用 COMSOL Multiphysics® 软件创建和分发仿真 App 来优化制造工艺和产品设计。IBEX (图 1) 是 ITW 最新生产的一款为专业厨房设计的固态微波 / 对流微波炉。与其他智能组合微波炉不同, IBEX 具有多种智能化功能,它改变了食物的加热方式。

射频技术可以保障在不同负载条件下烹饪所需的稳定性。ITW 的工程师正在研究使用固态射频功率放大器和接收器来控制射频能量。与传统的磁控管相比,这种固态射频

功率放大器和接收器能根据食物的类型或数量,以一种更智能、更均匀且更高效的方式引导能量。这项技术使 IBEX 不仅可以达到组合型微波炉的质量要求,而且烹饪速度更快。

IBEX 的靶向加热功能可以自动执行厨师和其他厨房工作人员设置的任务。除具备高效的固态微波加热功能外, IBEX 还具有算法编

程功能,并支持专业人员编写食谱程序和定制菜单,以及执行各种常见功能。此外, IBEX 还具有一个 USB 接口,可与其他设备连接并传输菜单。

智能厨用设备使专业厨师的工作更加轻松。那么,使用什么工具来设计这些设备呢?“在尝试利用微波或射频能量优化食物的加热方式时,我们可以使用仿真工具来准确预测结果。” ITW 的资深射频系统工程师 Christopher Hopper 说道,“通过仿真了解固态微波炉中可能存在的加热模式,可以进行更精准的实验设置。”此外,由于几乎不需要进行反复实验,仿真还为团队节省了实验成本,并提前完成厨用设备和相关实验的



图 1 ITW 生产的 IBEX 固态微波/对流微波炉。

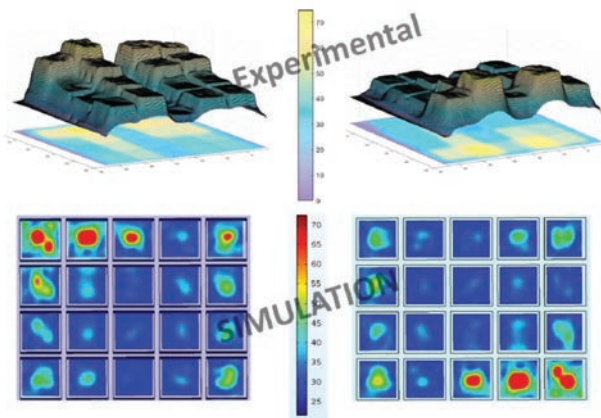


图2 设计不同烹饪配置组合,以改善食物加热的均匀性。

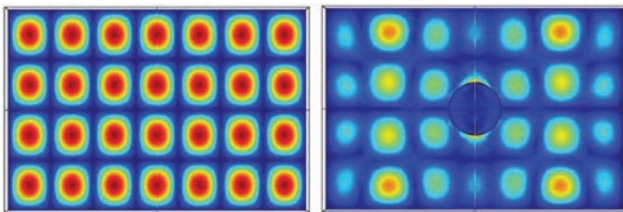


图3 有负载和无负载情况下,微波炉内的电场模式比较。

最优设计。

» 仿真与实验的完美结合

在仿真实验设计开始, Hopper 和他的团队使用了 COMSOL® 软件及其附加的射频模块来研究不同的负载、加热均匀性以及食物的受热点等。之后,他们利用软件的 LiveLink™ for MATLAB® 接口,将参数化扫描与复杂的后处理相结合以减少计算时间。Hopper 发现该接口非常有用,因为他经常使用 MATLAB® 软件。

在一个关于固态射频效率的 IBEX 实验设计中,为了研究对于不同容量的食物容器,以及对于不同负载微波炉如何保持高效运转, Hopper 和他的团队通过仿真对容器进行了测试,并研究了如何改进负载加热的均匀性。通过比较两种不同的食物排列方式:薄层组成的立方排列和柱状排列,他们发现对于每种类型的组合,固态射频微波炉都可以持续地将能量高效输送至负载。

目前,市场上出售的快速烹饪微波炉无法调整相位、频率

和输出功率等参数,因此当负载的体积、分布,以及数量发生变化时,加热效率会发生大幅波动。此外,对流微波炉或组合微波炉的效率还取决于负载的表面积,因此负载的数量增加并不一定会使烹饪或加热所需的时间增加。相比之下,对于不同组合的负载,IBEX 微波炉都能保持较高的加热效率,即同时拥有对流微波炉的质量特性与快速烹饪微波炉的速度特性。

然而,仅通过控制频率、相位和输出功率还不足以维持固态微波炉高效的能量输送。因此,他们采用了闭环反馈系统来改善烹饪配置。与开环式控制微波炉不同,闭环式控制微波炉允许设置初始加热条件,应用特殊的加热配置,并能适应烹饪过程中负载性能的不断变化。通过闭环控制,工程师可以将输出结果反馈回系统;通过比较实际输出与期望输出结果,他们可以设计出一个利用误差信号自动检测和监视输出差异的系统,从而通过改变负载、食物特性和其他条件来改善烹饪过程。通过从腔体/负载系统获得的反馈,工程师们可以通过测

试找出最佳的烹饪组合,并使用更小的标称功率来提高加热的均匀性和能量传递的持续性(图2)。

在此基础上,团队还可以继续完善测试和验证模拟结果。“COMSOL 多物理场仿真软件可以准确地对不同食材或负载进行电磁-热耦合。通常,负载的特性随温度和频率的变化而变化。”Hopper 说道,“软件不仅可以模拟这些变化,还可以精确地模拟加热模式、电磁场强度和功率损耗密度。”

例如,通过模拟结果,在有负载和没有负载两种情况下,团队可以找到受热点最有可能存在的位置(图3)。通过模拟结果来评估可能的加热模式、腔体和炊具的吸收等,可以帮助工程师设计实验,并在实验过程中收集不同频率下的热和电磁数据(图4)。此外,他们还可以通过比较不同食物(如面包和鸡蛋)中产生的温差来验证仿真结果的准确性。

» 智能厨用设备使生活更美好

除了进行更复杂的仿真之外, Hopper 还使用 COMSOL Multiphysics®

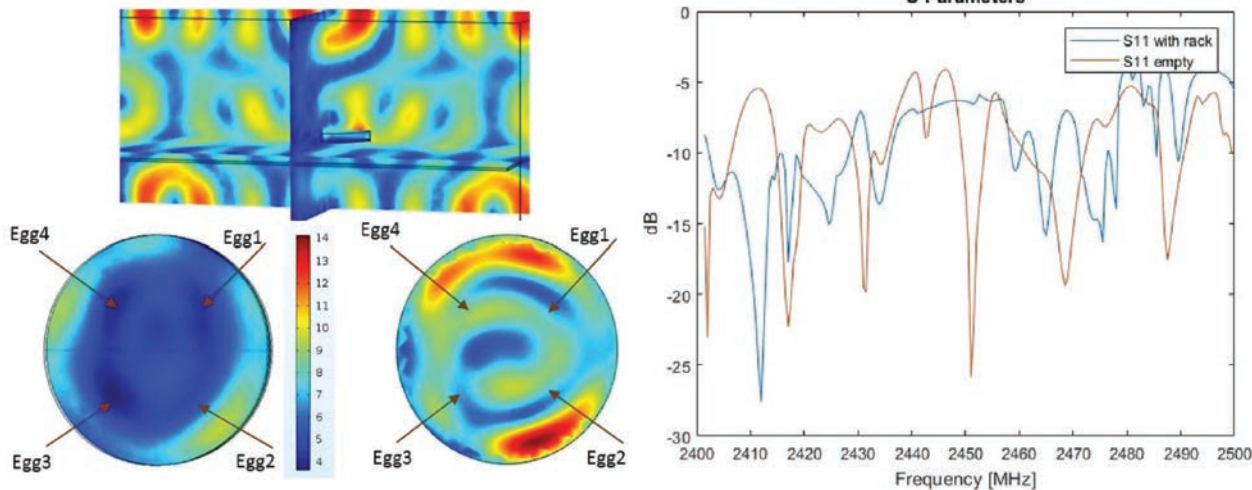


图 4 使用探头收集微波炉内鸡蛋中的热和电磁数据(左) ;含支架和不含支架的微波炉 S 参数(右)。

创建了仿真 App, 以便于其他同事参与设计, 如更改频率或相位响应、温度和时间(创建食谱时)、食材大小和摆放位置以及介电性能等。

在组织内部署仿真 App 有诸多优点。Hopper 说: “在一个具有不同技能水平和背景的多元化团队中, 根据个人兴趣和工作职责量身定制仿真 App, 可以减轻仿真专家的工作负担。” 此外, 仿真 App 还可以帮助他人学习。Hopper 创建了一个 IBEX 微波炉的仿真 App (图 5), 用于向团队新成员和实习生介绍波干扰、介电和损耗因子依赖性, 以及射频加热等基础知识。

固态微波厨用设备推动了烹饪艺术的进步, 靶

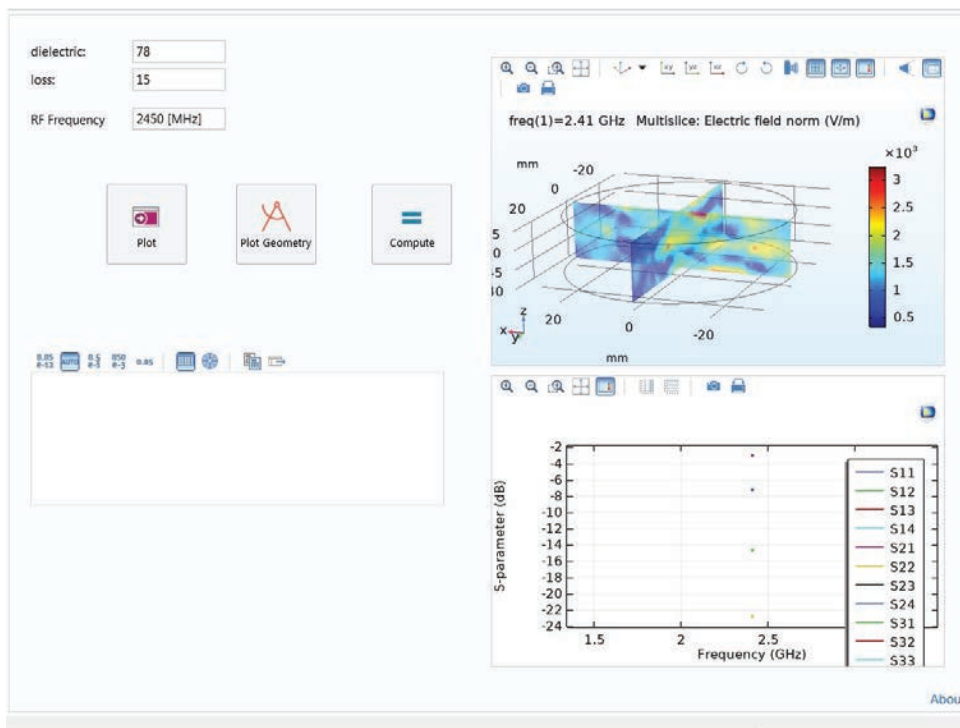


图 5 IBEX 微波炉的仿真 App 用户界面。

向食物加热只是其中的一项功能。通过持续使用 COMSOL 多物理场仿真软

件的计算、仿真 App 和后处理等功能, 食品设备制造行业的工程师和制造商可以为专业和家用厨房设计出更高效、更可靠的智能电器。©

仿真 App 助力 汽车音频系统设计

哈曼公司的专家正在构建和部署仿真 App，以开发出能够满足客户期望的汽车音频系统，同时改进其内部工作流程。

作者 THOMAS FORRISTER

随着消费者的个性化需求越来越多，豪华汽车市场正迈向全新的领域。汽车的设计目标之一是为驾驶员和乘客提供良好的驾驶和乘坐体验：舒服的按摩座椅，加热的方向盘，时尚的内饰，宽敞的空间，当然还要有电子娱乐设备。在过去的十年里，音频和多媒体系统在汽车中的重要性显著提高，因为汽车已成为许多消费者生活中的一部分。有研究表明，汽车是人们听音乐的首选场所，而他们的期望是获得与家庭音响系统同样高质量的聆听体验。然而，想要设计出这样的汽车音频系统会面临许多挑战。

从系统工程的角度来看，汽车内饰设计采用了各式各样的硬质和软质表面。这些设计可以带给我们不同风格和舒适度的体验，但往往会干扰声音的效果，因为它们可能会反射或吸收声音。然而，更大的挑战是，消费者期望汽车中的新应用、新功能，以及新的聆听体验能像智能手机发布新功能一样快速更新。消费类电子产品的开发周期（有时甚至不到 6 个月）比汽车（5~6 年）要短得多。三星电子有限公司的子公司哈曼国际使用仿真软件创建了可以用来改进工作流程、加快产品开发速度，以及能够帮助工程师突破车载音频技术极限的仿真 App。

» 个性化的车载音频体验

消费者每天会花很多时间在汽车上，开车上下班或在城市兜风。对于很多人来说，汽车不仅仅是从 A 地去往 B 地

的交通工具，他们更想要最大程度地享受自己的旅程，从中获得自由感、冒险感，或是想要获得从日常生活中逃离片刻的宁静。为了创造出这种终极体验，汽车显示器、各种汽车应用以及音频系统必须能够协同工作。

哈曼公司首席工程师 François Malbos 表示：

“如今的消费者无论是在家里，在路上，还是在车里都需要个性化的体验。豪华汽车会使用更多的技术、更多的扬声器以及更复杂的音频系统。在中档车中，个性化功能受到很多限制，并且集成技术较少。车载音频系统功能越多，就会变得越复杂，但我们看到的界面必须简单、

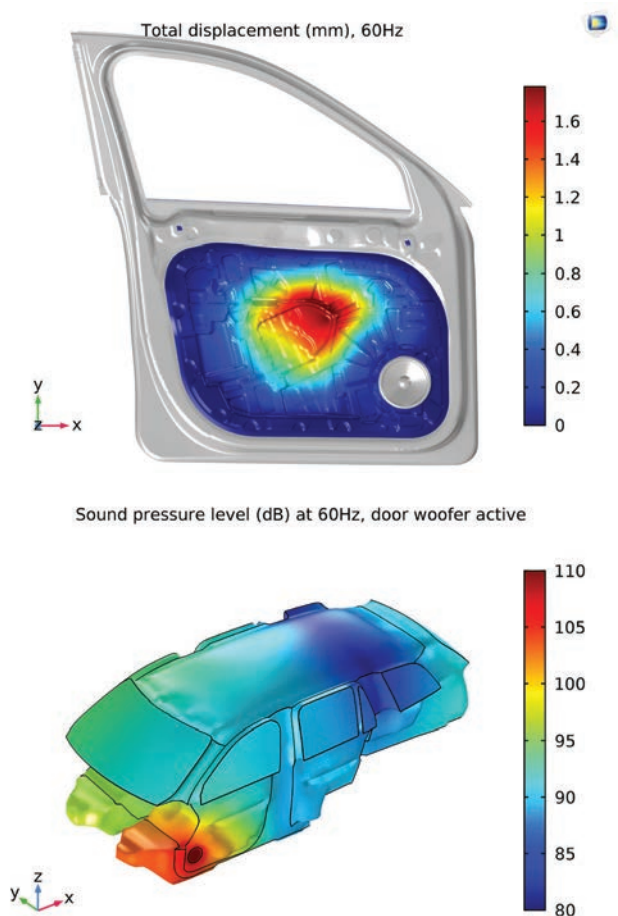


图 1 车门硬度分析(上)。不同扬声器位置的车厢模拟图(下)。图注: Total displacement(mm), 60 Hz - 声音频率在 60 Hz 时的总位移 (mm); Sound pressure level (dB) at 60 Hz, door woofer active - 低音扬声器在声音频率 60 Hz 时的声压级 (dB)。

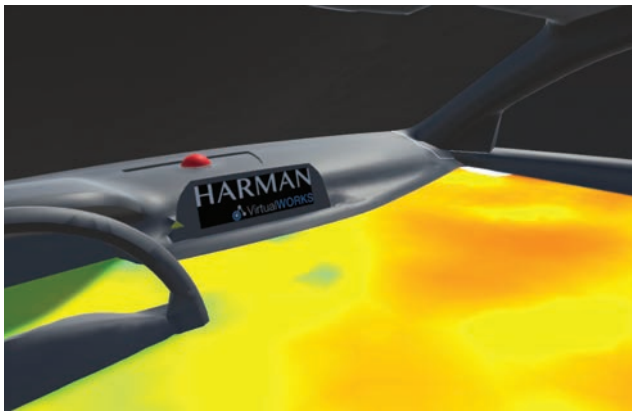
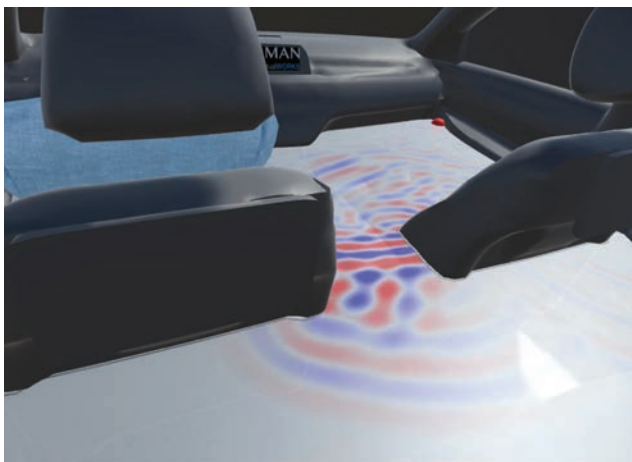


图2 在汽车环境中,后座(上)和右前扬声器(下)的声场得到了增强。

直观,并且具有可扩展性。”

以往,汽车的价值是由其机械性能和行驶动力学来衡量的。随着共享出行和车载技术的普及,汽车的价值是通过乘客时时刻刻的感受来衡量的。70多年来,音频行业有了突破性的发展,哈曼公司致力于以消费者为中心来提供个性化的音频体验。例如,哈曼的虚拟技术可以再现特定场所的声音,该技术可以将观众瞬间带到音乐厅、体育馆、舒适的爵士俱乐部或录音室。

对于高级通信问题,哈曼的解决方案是利用智能音频和声音信号处理的最新研究成果,为所有乘客提供清晰、无障碍的语音通信——无论是与语音助手,与别人打电话,或是乘客之间的交流。还有高级的语音命令功能可以让驾驶员在使用电话或信息娱乐屏时将目光停留在道路上,手放在方

向盘上,从而提高了交通安全性。

为了平衡豪华汽车中内置的各种个性化功能,哈曼的声学 and 仿真专家在设计早期就考虑了不同的组件、声学仪器和独特的配置(图1)。这些工程师通过新颖的思考方式进行设计,即围绕音频系统设计汽车,而不是在汽车上添加音频系统。这种方式有助于团队在接到客户更改通知时能够立即作出应对。此外,汽车内饰的材料,车门的硬度等因素会影响汽车的音响效果,因此设计师需要就上述因素对音频系统进行改善。

对音频系统高度敏感的设计加大了产品开发、汽车基准测试以及对质量保证的难度。哈曼虚拟产品开发(Virtual Product Development, VPD)高级经理 Michael Strauss 说:“幸运的是,哈曼具有独特的优势——我们内部开发包括了从初始设计到制造阶段的所有内容,这使我们的系统在市场上独树一帜,可以直面挑战。”

为了简化工作流程,哈曼使用 COMSOL Multiphysics® 软件来加速

设计和生产过程,预测和验证车厢内的测试结果,并最终改善他们的设计。

» 仿真 App 助力音频系统设计

仿真在哈曼产品开发中扮演着重要角色,公司最终目标是对传感器、汽车外饰、车厢、双耳环绕立体声等实现完全虚拟的开发。现在,VPD 团队将物理实验与数值建模相结合来进行研发。未来,越来越多的现场听力测试将被虚拟测试所取代。在使用 COMSOL Multiphysics® 开发虚拟音频系统时,哈曼工程师可以对汽车的不同硬件装置和独特的设备进行快速调整。此外,还可以将实际车内的测试结果与模拟结果进行比较(图2)。

哈曼探索了将数学模型转变为数字孪生模型和仿真 App 的方法。哈曼 VPD 项目负责人 Michal Bogdanski 说:“所有模型对边界条件的变化都很敏感,并且每个仿真结果都可能使用了不同的仿真定义和物理场接口。不过当我们有了仿真 App 或数字孪生模型后,就不用再担心那么多

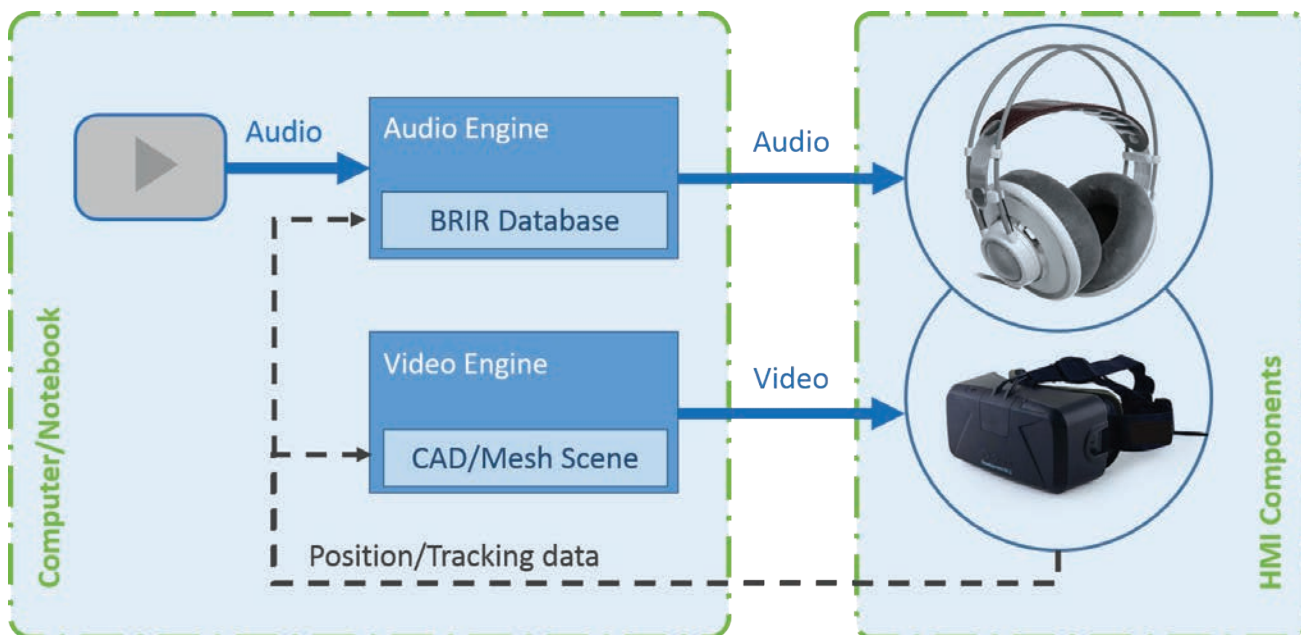


图3 哈曼的虚拟现实设备。

图注：Audio - 音频；Audio Engine - 音频引擎；BRIR Database - BRIR 数据库；Video - 视频；Video Engine - 视频引擎；CAD/Mesh Scene - CAD/网格场景；Position/Tracking data - 位置/跟踪数据；Computer/Notebook - 电脑/笔记本电脑；HMI Components - HMI 组件。

了,因为我们可以锁定指定的边界条件。这些参数对于物理定义至关重要,使用仿真 App 的用户无法对其进行更改。这种方法可确保结果与测试结果相符。”

哈曼的仿真模型在日常生活中受到了评估和验证。VPD 团队开发了一个仿真工作流程,以便为开发项目的任何阶段提供数值支持。基于工业信息化的考虑,团队希望将仿真技术以及仿真 App 引入传统的工作流程中,并最终将其转换为 VPD 工作流程。

使用该仿真 App,可以让用户和建模专家在公司内一起工作,这样就可以在早期对设计进行修改。为了进一步加快工

作进程, Malbos 用一个路线图帮助哈曼设计了一个所有仿真 App 用户都可以访问的工具箱。这使仿真 App 更适用于需要长期资源规划的项目。Malbos 说:“它确实改善了我们的工作流程。因为不是所有人都在同一时间工作,仿真 App 有助于跟踪项目状态并在全球性

的跨职能团队合作下推进项目。”Strauss 补充说:“此外,该仿真 App 使团队中并不精通仿真的成员受益。仿真 App 可以提供两个方面的帮助。一方面,设计师的工作流程将变得更加高效,并且他们将对产品功能有更多的了解。另一方面,仿真专家可以摆脱一些日常任务,专注在一些需要更多时间和资源的项目上。”

通过来自不同用户群体的反馈,这些仿真 App 正在不断被改进。这些反馈有助于找出潜在的错误,同时对仿真 App 提出需要改进的

“并不是所有人都在同一时间工作,因此仿真 App 就很有帮助。它可以让用户找到所需的東西,也可以让仿真专家专注于更重要的项目。有了仿真 App,我们可以创建一套统一的工具,以供机构的专家们使用。”

——FRANÇOIS MALBOS, 声学工程师, 哈曼公司

意见和建议。为了给用户提供最舒适的体验,这些建议会被定期讨论,然后由团队选择并且实施。

对虚拟仿真建立信任是仿真 App 能够被广泛使用的重要因素。每个仿真 App 的用户都需要平衡材料参数、高质量数据、解决方案和输出的结果。此外,对于高级仿真,需要准确的再现演绎、验证以及沟通,以使用户了解测试结果。

Strauss 说:“为了帮助用户建立信任,每个应用程序都会附带一个 PDF 验证文档,类似于当你购买麦克风时会附带一张维修表。该 PDF 文档包含测试结果与仿真 App 或数字孪生模拟的对比。”

VPD 团队使用 COMSOL Server™ 建立了一个经过验证的仿真 App 库,其他工程师可以使用这些仿真 App 来预测扬声器在各种配置和不同条件下的性能。哈曼的换能器工程部门是第一个使用这些应用程序的部门,不过其他部门,例如声学工程部,很快就对此产生了兴趣。“大家都在慢慢接受仿真 App。”Strauss 说道。仿真 App 的广泛使用可以让 VPD 团队的仿真专家专注于更重要的项目,比如虚拟现实。

» 哈曼虚拟现实工具

HARMAN VirtualWORKS (哈曼虚拟工具)是哈曼的音频开发工具之一,最近已扩展为 HARMAN VirtualWORKS VR (哈曼虚拟现实工具)。借助交互式 VR 功能,客户可以获得与乘坐实际汽车相同的听觉体验。对于音频设计师与汽车制造商而言,这是系统设计环节中的一个关键优势。汽车制造商可以在虚拟的汽车上体验音响系统的性能,而不必制造一个实际的样车。

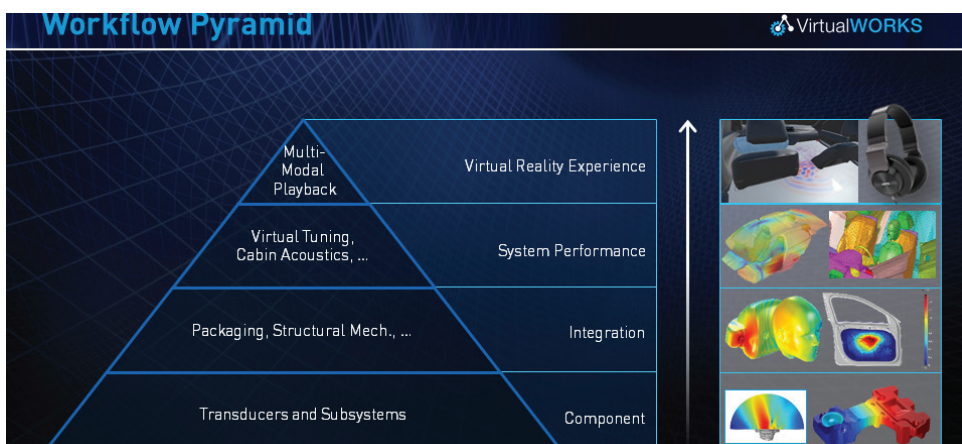


图 4 HARMAN VirtualWORKS 的数值模拟工作流程。

图注: Multimodal playback - 多模式播放; Virtual Reality Experience - 虚拟现实体验; Virtual Tuning - 虚拟调整; Cabin Acoustics - 舱内声学; System Performance - 系统性能; Packaging - 封装; Structural Mech - 结构力学; Integration - 积分; Transducers and Subsystems - 传感器和子系统; Component - 零件。

Bogdanski 表示:“VirtualWORKS VR 为用户提供了测试车厢内系统和声场的机会。有了 VR 装置和眼镜,客户就可以乘坐汽车来感受音频系统内的各项性能。同时,它还可以帮助 OEM 室内设计师了解他们的想法,以及用不同的方式塑造内饰对音效产生的影响。”

Strauss 补充说:“特别地,对于内部决策过程以及 OEM 主管而言,有时很难仅凭数字来说服一些关键的利益相关者。VirtualWORKS VR 是一个很好的工具,用来说明和演示系统在考虑了相关因素和在特定设置情况下的性能。就像仿

真 App 一样,它是实现产品开发流程数字化转型的另一个强大驱动力。”借助头戴式的 VR 装置,音频可通过 3D 运动和高分辨率图形实现可视化。这种增强现实技术为用户带来了车载体验,并帮助他们实现了不同配置扬声器的声场可视化(图 3)。

用于豪华汽车的新产品和新技术既要创新又要成熟,同时还需要跟上客户不断增长的个性化需求。哈曼将先进的工具整合到工作流程中来优化设计,从而推动了汽车音频系统的开发(图 4)。不久的将来,哈曼或许能够在制造样车前,在开发周期内实现完全虚拟化。◎

借助仿真探究布里渊光学相互作用

通过电磁学和固体力学耦合建模分析,巴西坎皮纳斯大学和康宁公司研究了光弹性效应和移动边界效应如何通过相互作用,来增强或抑制光波导、光纤及其他纳米光子结构中的布里渊散射。

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

光波导是引导光波传播的一种介质装置,又称介质光波导。自20世纪70年代以来,光波导研究取得了很大进展,波导的尺寸被设计得越来越大。研究人员发现,光弹性效应是波导(尤其对于光纤而言)设计中的重要影响因素。随着光力学概念的引入,设计中还需要进一步考虑波导的移动边界效应。光弹性效应与移动边界效应之间存在复杂的相互作用,可以增强或弱化布里渊散射。布里渊散射是一种光与物质波在介质中的相互作用,以莱昂·布里渊(Léon Brillouin)命名。巴西坎皮纳斯大学(University of Campinas)和康宁公司(Corning)的研究团队使用多物理场仿真研究了光弹性效应与移动边界效应之间的共同作用,以及如何利用布里渊散射优化纳米光子结构。

光弹性效应与移动边界效应

布里渊光学相互作用包括光弹性效应与移动边界效应的耦合。一方面,在设定图形的边界或几何结构时(例如,当设计一个较薄的波导时),需要考虑移动边界效应。另一方面,由于不同的光纤材料会产生不同的弹性应力,从而影响波导的折射率,因此需考虑材料的光

弹性效应。以锥形光纤为例,当几何结构改变时,移动边界效应会对布里渊散射造成影响;当使用不同的光纤材料时,光弹性效应则会影响到布里渊散射。

布里渊散射: 增强或抑制

在光力学研究中,通常需要增强或抑制布里渊散射。例如,在通信系统中,当大量光波在光纤中传播时,布里渊散射会导致光波向后散射而不是向前传播。这意味着光几乎无法从输入端穿过光纤,从而导致传输障碍。因此,在光纤和加速度计等设计中需要抑制布里渊散射(图1)。那么,什么时候需要增强布里渊散射呢?在集成波导滤波器设计中,需要增强布里渊散射。通过控制波导中的力学相互作用创建一个窄带激光器,或者利用布里渊散射获得特定的频率和波长,即可得到一个极其精确的滤波器。

来自坎皮纳斯大学光子学研究中心和康宁公司的 Gustavo Wiederhecker、Paulo Dainese 和 Thiago Alegre 教授,致力于研究移动边界效应和光弹性效应之间的相互作用,及其对布

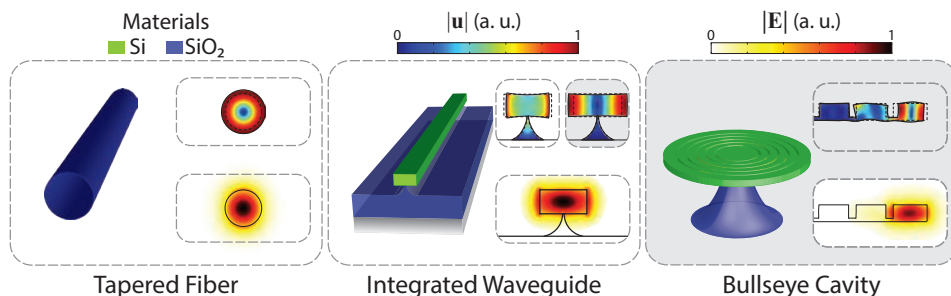


图1 使用 COMSOL Multiphysics® 仿真软件对纳米光子结构中的布里渊散射进行建模。锥形光纤(左)、集成波导(中)和靶心腔(右)模型。

图注: Materials - 材料; Si-硅; SiO₂-二氧化硅; Tapered Fiber - 锥形光纤; Integrated Waveguide - 集成波导; Bullseye Cavity - 靶心腔。

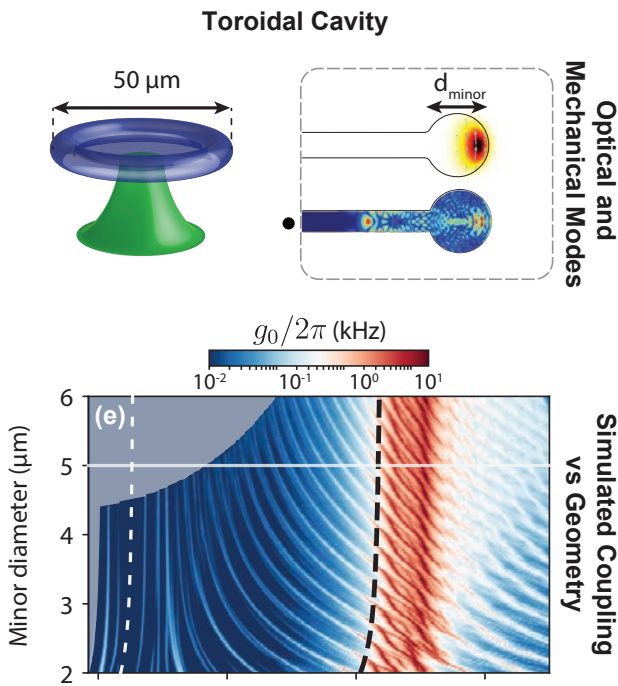


图2 使用 COMSOL 多物理场仿真软件对环形腔进行光力学建模 (上);不同几何形状的光弹性效应和移动边界效应(下)。图注: Toroidal Cavity - 环形腔; Optical and Mechanical Modes - 光力学模式; Simulated Coupling vs Geometry - 耦合仿真结果 vs 几何形状; Minor diameter (μm) - 环形小直径 (μm)。

里渊散射的影响。通过探究两种效应之间的相互作用，根据纳米光子结构中是需要增强还是抑制布里渊散射，建立有效（或无效）的耦合是该团队的一个主要研究目标。

» 布里渊光力学相互作用的多物理场仿真

为了深入探究光弹性效应与移动边界效应如何进行复杂的相互作用，坎皮纳斯大学的研究团队使用 COMSOL Multiphysics® 软件对纳米光子结构中的光弹性效应和移动边界效应进行了耦合，并对结构中发生的布里渊散射进行建模。为了方便建模，并与实验结果进行比较，他们从简单的二维模型开始研究。“二维模型的求解速度非常快” Alegre 说道。首先，从建立简单的结构开始（如建立单根硅胶棒），再结合电磁学和固体力学分析，最终构建出完整的纳米光子结构（图2）。然后，研究人员利用仿真结果计算光场和力场的重叠面积，这是分析布里渊散射的关键步

骤。“当获得重叠面积后，就可以了解并绘制出光力学积分函数，这对我们的分析非常有帮助。” Alegre 说道，“COMSOL Multiphysics® 软件是极少数能够进行此类分析的软件（产品）之一。”

通过建模，坎皮纳斯大学的研究人员发现 COMSOL® 软件的多物理场功能非常强大。通常，使用其他软件同时求解光弹性效应和移动边界效应时，需要先求解其中的一种物理场，然后导出结果，再返回求解另一种物理场；而使用 COMSOL 多物理场仿真软件，则可以将多个物理场耦合在一起同时求解，简单并且高效。此外，COMSOL 还具有简洁、直观的用户界面。“COMSOL 的用户界面非常好用，” Alegre 说道，“在运行仿真后，我们可以立即在用户界面获得相关的耦

合系数。”同时，研发团队还非常喜欢用户界面中的后处理功能。Alegre 说：“使用其他任何软件进行建模，都必须编写后处理代码以获得所有积分。而在 COMSOL Multiphysics 中，后处理可作为仿真工作流程中的一部分”。

» 未来研究

未来，坎皮纳斯大学的研究人员计划探索不同材料对光力学相互作用的影响，并研究纳米光子结构中不同材料的混合封装。同时，他们还计划研究不同几何形状对光力学相互作用的影响，以设计出更好的布里渊散射光波导。

此外，为了吸引对纳米光子学感兴趣的学生，坎皮纳斯大学创建了一个数据库，用于“纳米光子结构中的布里渊光力学研究”项目 [APL Photonics 4, 071101 (2019)]。该数据库储存了研究人员建立的所有模型和代码，通过更改模型和代码的设置，可以改变波导或空腔的几何形状，并对布里渊光力学相互作用进行实时观测。这有助于激发学生的创造力，并提出新颖的观点。◎

“COMSOL® 的用户界面非常好用，在运行仿真后，我们可以立即获得相关的耦合系数。”

—THIAGO ALEGRE, 坎皮纳斯大学

大型电气设备性能的仿真优化

平高集团使用 COMSOL 多物理场仿真软件提高了大型电气设备的研发效率,大幅减少了产品的研发成本,并通过仿真 App 为企业内跨部门的合作提供了极大的便利。

作者 YUHANG QIN, BO ZHANG

随着社会对电力能源需求的增加,电力电网规模越来越大,需要更多的电气设备投入电网。变电站是电力系统重要的组成部分,与人们日常生活息息相关,其主要作用是对电压进行变换,以及接受和分配电能。为了减少电能传输线路上的损耗,发电厂产生的电能长距离传输前需要在变电站将电压升高;而为了确保用户的用电安全,又需要在供给用户电能前在变电站内将电压降低。

常规的变电站中包含了大量的电气设备,这些设备按照功

能的不同被设置在多个配电室中。由于使用空气作为绝缘介质,为了满足绝缘需求,不同的设备间需要保持一定的安全间距,这导致变电站的整体占地面积非常大。此外,由于变电站中的许多配

增加了变电站的维护工作。气体绝缘金属封闭开关(gas insulated metal and enclosed switchgear, GIS)是一种新型的高压配电装置,通过优化设计以及使用特殊的绝缘气体,可以将变电站中除变压器以外的各类设备合理、紧凑地组合成一个整体。相比于常规的变电站, GIS 具备结构紧凑、占地面积小、可靠性高、安全性强、维护工作量小等优点,近年来获得了广泛的应用。

虽然 GIS 的可靠性高于传统变电站,然而在长期的运行过程中,会因绝缘子、绝缘操作杆等固体绝缘介质表



图 1 1100 kV GIS。平高集团供图。

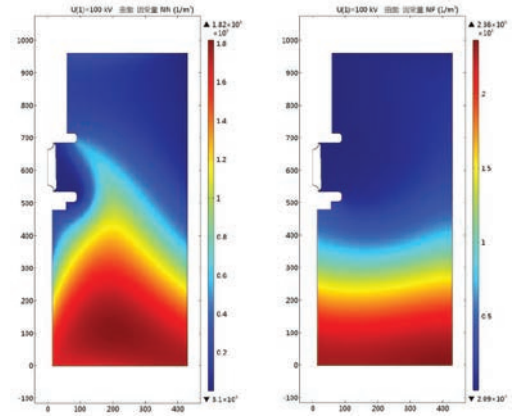
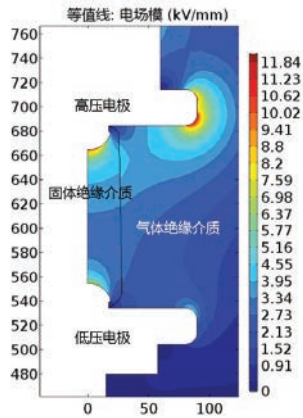
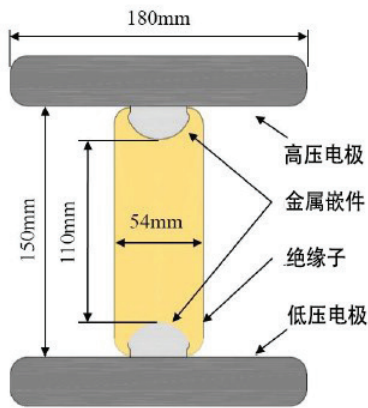


图 2 GIS 绝缘系统组件截面几何结构示意图(左);施加 100 千伏高压后绝缘子及其周围的直流电场分布图(右)。

图 3 GIS 绝缘系统组件截面上的负离子(左)和正离子(右)的分布情况。

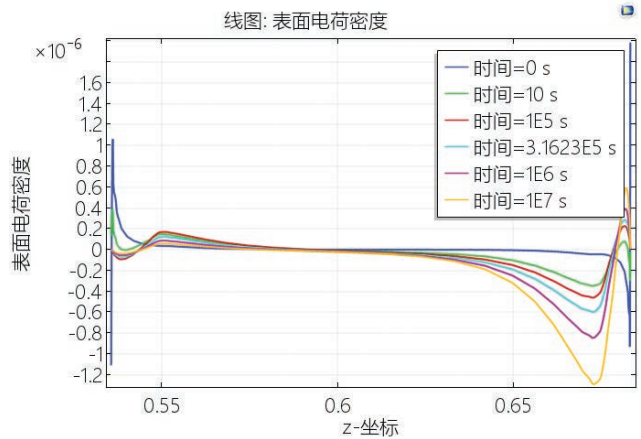
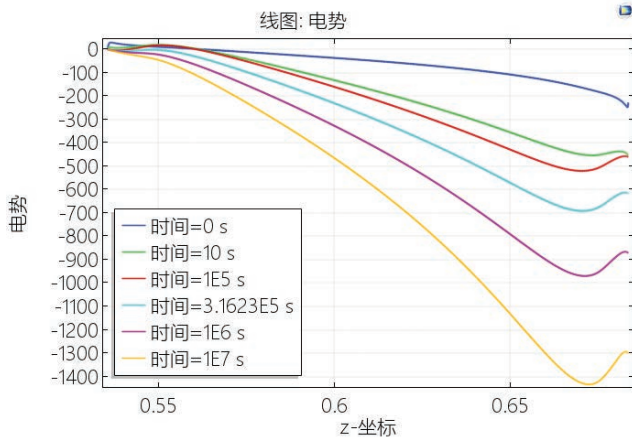


图 4 绝缘子表面电位(左)和电荷密度(右)随时间的变化。

面积累的电荷导致绝缘失效,造成严重的安全事故。GIS 的全封闭结构还会导致对故障的定位和检修都十分困难。为了提升 GIS 组件的安全性、减少故障发生率,使 GIS 能够更稳定地运行,平高集团有限公司开展了大量的研究工作,致力于

“使用 COMSOL® 软件,我们能够快速、高效地解决潜在问题,并使研发成本大幅减少。”

——张博,平高集团

开发出高效、稳定的 GIS 设备。平高集团有限公司是国家电网公司直属单位,是中国电工行业重大技术装备支柱企业。

» GIS 绝缘失效的仿真分析

相比于传统的变电站, GIS 在体积和集成度方面的优势得益于设备中不同组

件之间良好的绝缘性。GIS 中的全部电气组件都被封闭在接地的金属壳体内,并充入了合成惰性气体六氟化硫(SF₆)进行绝缘。由于 SF₆ 的绝缘性能和灭弧性能都远高于空气,所以 GIS 内组件间的距离可以大幅减小,因此其体积可以远小于传统变电站。GIS 在长期运行过程

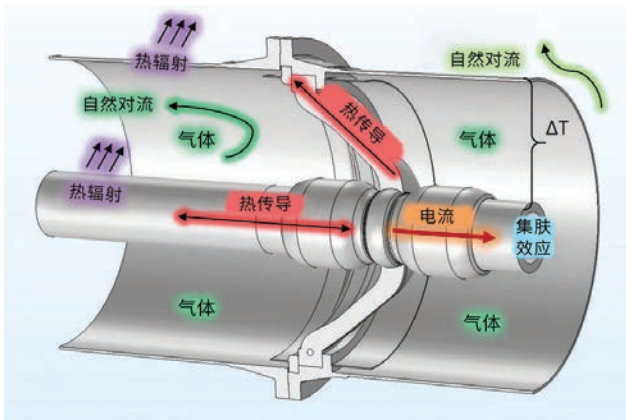


图 5 GIS 中母线传热仿真模型结构示意图。

中, 电荷会在 GIS 内部绝缘气体和固体绝缘介质的交界面聚集。当聚集的电荷达到一定的数量后, 过高的电压差会导致固体绝缘介质周围的气体被击穿, 并沿固体绝缘子表面放电。局部放电后, 被电离的绝缘气体以及金属部件等会产生分解物, 从而导致绝缘失效。

绝缘失效是 GIS 设备中的常见故障, 严重制约了其在工程方面的应用。绝缘失效是一个复杂的物理问题, 涉及电场、温度场、结构等多个物理现象间的相互耦合。如果通过实验来分析该问题, 实验设计和测试都具有较大难度。此外, GIS 设备造价昂贵, 导致每一次实验测试需要花费大量费用。平高集团的张博工程师表示, “仅以 1100 千伏套管的测试为例, 减少一次套管试验, 可以节省加工及测试费用约 1000 万元。” 为减少研发成本, 同时提高研

发效率, 平高集团开始使用 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件对 GIS 设备的绝缘问题进行分析。

平高集团的工程师在 COMSOL 多物理场仿真软件中创建了适用于直流 GIS 气固绝缘电场分布和表面电荷积累计算的数值模型。如图 1 的左图所示, 模型由高压电极、低压电极、绝缘子和金属嵌件组成, 这些组件放置在绝对压力为 0.4 兆帕的 SF₆ 气体中, 通过将 100 千伏高压电源加载至高压电极形成直流电场。研究团队对电场分布情况进行了模拟, 图 1 的右图显示了加载电压后气固绝缘介质中的电场分布。

对于固体绝缘介质来说, 电荷密度取决于材料介电常数和电导率。在气体区域, 由于气体中正负离子在电场作用下的漂移以及浓度梯度造成的扩散, 其电导率呈高度非线性。由于气固介质界面存在电导率及介电常数的不连续情况, 电荷必然在边界积聚, 从而畸变了原有的电场, 减弱了直流电场下绝缘子的绝缘性能。

随后, 工程师对绝缘体中的正负离子的浓度分布进

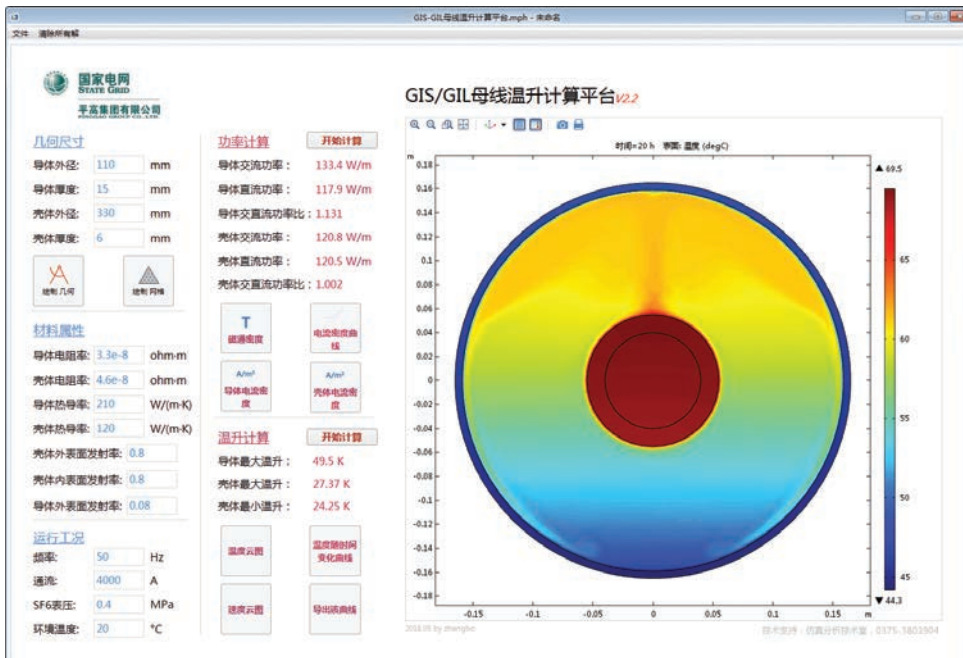


图 6 GIS 温升仿真 App。

“仿真 App 的出现,极大地促进了经验的传承和知识的分享,现在整个企业都可以受益于仿真分析带来的优势。”

——张博,平高集团

行了模拟(图 2),得到了气体区域内不同区间的粒子浓度分布,以及气体电导率的非均匀空间分布,为提升系统绝缘效果提供了有力支持。

根据电导率仿真结果,工程师获得了表面电位和表面电荷随加压时间的变化(图 3)。可以看出随时间推移,电荷集聚增多,在 107 秒(约 3000 小时)后达到稳定。

工程师根据上述仿真结果,进一步研究气体离子对产生率、固体绝缘介质体积和表面电导率对表面集聚电荷极性和分布的影响规律。该研究将有助于通过减小关键区域电场和最小化局部表面电荷累积来改善 GIS 的绝缘设计,优化绝缘子的几何形状和材料特性,以及相关的验证设计变更。

» 仿真助力 GIS 设备的优化

温度控制是 GIS 优化工作中另一个需要重点关注的问题。GIS 设备在运行过程中,由于电流通过母线

时会产生大量的焦耳热,造成内部温度升高,进而可能引起内部各类组件的过热故障。针对母线温升及散热性能的优化是提升 GIS 设备性能的有效手段。

平高集团的研发团队在 COMSOL 软件中建立了模型,用于研究 GIS 中母线的温度变化(图 4)。仿真模型中考虑了传导、对流和辐射三种散热模式,可以根据设备中的电阻热以及设备的散热情况,计算出设备在稳态运行时的内部温度分布。

温升仿真结果可以帮助产品研发人员在 GIS 设计阶段实现准确预估产品在运行过程中的温升状况,进而优化材料类型、产品尺寸、结构布局等多项参数,避免 GIS 设备因温升问题造成的各类过热故障。

» 让整个企业受益于仿真分析的强大力量

平高集团的 GIS 产品设计人员在研发过程中经常需要调整设计参数,因此会

求助于团队内的仿真工程师。即便是一个常用参数的调整,仿真工程师也需要针对每一个需求调整底层模型

的设置,这造成了大量的重复工作,时常导致仿真分析结果的延迟。为了提升仿真分析的效率,平高集团的工程师使用 COMSOL 软件中的 App 开发功能,将 GIS 温升模型封装成了仿真 App。所有设计人员都可以利用图 5 所示的仿真 App 方便地计算不同参数带来的功率和温度变化,并使用分析结果对产品进行优化。现在,平高集团的产品设计人员、工程设

计人员和运维服务人员都可以借助简单易用的仿真 App 进行 GIS 的开发和维护工作,为企业内跨部门的合作提供了极大的便利。张博表示:“仿真 App 的出现,极大地促进了经验的传承和知识的分享,现在整个企业都可以受益于仿真分析带来的优势。”

目前,平高集团正在开展基于云计算的高压开关仿真 App 开发研究。平高集团的仿真团队希望能够通过更加深入地开展高压开关多物理场仿真研究,帮助产品设计人员研发出性能更优的 GIS 产品。◎



平高集团技术中心的仿真团队,从左到右依次为:张豪、王刚、王之军、刘亚培、郭焯敬、张博、郝相羽、姚永其。

光学系统的多物理场仿真

使用 COMSOL Multiphysics® 软件对透镜系统中复杂的结构 - 热 - 光学耦合现象进行多物理场仿真分析。

作者 CHRISTOPHER BOUCHER

多物理场仿真软件已成为光学系统设计、优化和诊断中不可缺少的工具。建立高保真的仿真模型,可以大大减少在原型设计和测试中耗费的时间和精力。

对在极端环境下使用的相机、望远镜和光谱仪等设备,建立高保真的光学仿真模型是一项极具挑战性的任务。例如,对航天器中的光学系统进行建模非常困难,因为在太空环境中,航天器需要经受极端温度变化的影响,有时处于接近绝对零度的冷真空环境下,有时会面临强烈的太阳热辐射。

由于大多数光学材料的折射率都与温度相关,因此温度变化会直接影响光学系统的性能。此外,热应力与载荷共同作用也会导致结构发生形变,从而影响系统的性能。本文将探讨如何使用多物理场仿真软件进行结构 - 热 - 光学 (structural-thermal-optical performance, STOP) 耦合建模与分析。

» 简化的 Petzval 透镜系统模型

首先,建立一个处于恒温环境中且不受任何外力作用的 Petzval 透镜系统。该系统由前透镜组和后透镜组构成,其中后透镜组是一个平场透镜。图 1 显示了一束平行光从左侧 (绿色) 透镜向右侧 (红色) 像平面传播的过程,以及像平面和透镜组的孔径光阑。

将 Petzval 透镜系统置于一个具有应力和温度梯度的真实环境中,为了进行准确的 STOP 分析,不仅要透镜组建模,还要对其周围的环境进行模拟。因此,我们需要考虑以下

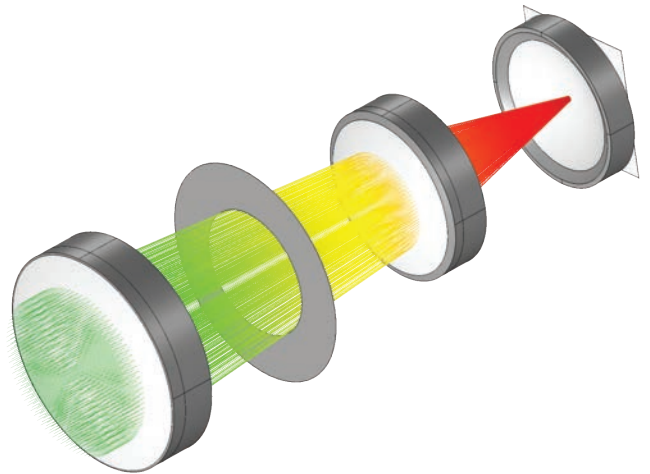


图 1 平行光束自 Petzval 透镜的左侧 (绿色) 向右 (红色) 像平面传播。

问题:

- 镜头该如何安装?
- 结构分析的边界条件是什么?
- 温度的边界条件是什么?

为了模拟上述工作过程,我们对已建立的 Petzval 透镜几何模型进行了修改。即将 Petzval 透镜模型安装在一个镜筒中并将其置于一个热真空腔室内,通过调节压力和温度来模拟太空环境。图 2 为透镜组、镜筒、底座和热真空腔室的截面图。在发射至太空之前,将航天器置于一个环境可控的真空腔室中,可以测试相机或望远镜在低温下的光学性能。

如图 2 所示,整个镜筒被置于隔热罩 (1) 内,通过

一定的冷却方法使隔热罩的边界温度维持在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热辐射通过外部的真空窗口 (2) 和透热窗口 (3) 进入隔热罩内,透热窗口用于调节透镜内的温度。隔热罩外部的环境温度为室温 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)。该系统还包括了透镜组 (4、5 和 6)、像平面 (7)、镜筒 (8),以及刚性支撑件 (9) (假设其位移为零) 等其他组件。求解的变量包括透镜组的温度,镜筒中和窗口处的温度,透镜组和镜筒的结构位移,以及光线穿过系统的路径。

» STOP 模型的数值耦合分析

从数值分析的角度,对 STOP 模型进行分析具有一

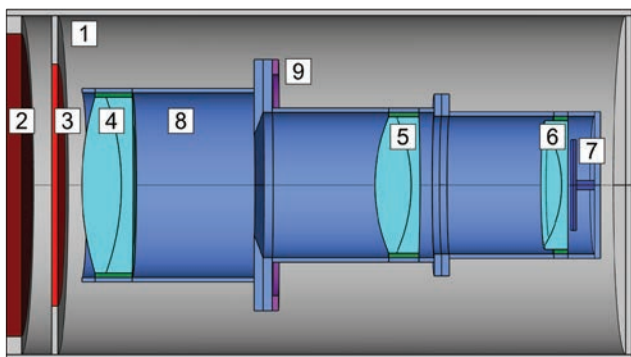


图2 热真空腔室环境下,安装在镜筒中的 Petzval 透镜组示意图。

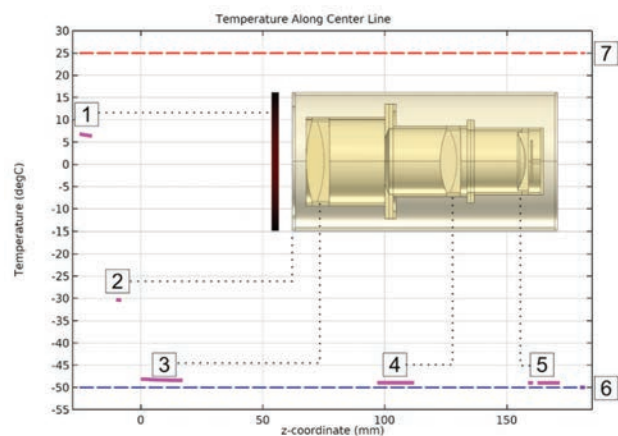


图3 透镜组、镜筒和隔热罩的温度仿真结果。

定的挑战。相较于单纯的光学模型分析,对结构-热模型进行数值分析需要使用不同的方法。其中,有限元分析是最可靠、最灵活的方法,其分析过程为先将模型分解为多个离散的数值单元,然后将每个单元中的应变和温度近似地划分为分段函数。对于上述光学系统仿真,最好采用射线追踪法,这是因为有限元分析需要将模型划分为足够多的网格以解析不同频率的波长,对于光的频率而言这则难以实现。

如果使用有限元法对离散的几何图形进行结构-热模拟,同时使用射线追踪法进行光学模拟,那么我们该如何考虑结构上的形变和温度的变化对光学性能的影响呢? COMSOL Multiphysics® 在同一用户界面内集成了几何建模、网格划分、求解器以及后处理等仿真分析中的所有

工具。而且从 COMSOL Multiphysics® 5.4 版本开始,我们可以使用特定的模块进行 STOP 耦合分析,同时软件内置的案例库还提供了示例模型。

» 传热仿真中的条件设定

经真空窗口和透热窗口传入真空腔室内的辐射具有较宽的光谱范围。我们假设可见光频率内的光线能被透镜折射,而在红外光频率下透镜是不透明的,这意味着入射的辐射会被吸收,之后向各个方向散射。因此,对传入腔室的辐射过程进行建模需要使用两种不同的方法。在可见光范围内,我们使用射线追踪法来观察光线的聚焦行为;而在红外领域,则需要同时模拟穿过透镜和镜筒的热辐射过程。

在多物理场仿真分析中,对热辐射(假设为理想的漫反射表面)进行建模的最优方法是辐射度法。因此,辐射度法(用于表面对表面辐射)与有限元方法(用于固体中的热传导)相结合可用于传热建模。由于透镜组和镜筒均处于真空环境中,因此无需考虑对流传热。

» 变形几何中的射线追踪

射线追踪算法会自动考虑热和应力导致的光色散。在这种方法中,由于光线是与几何边界上的网格框架表述相互作用,而不是与其解析表述实现交互,因此可以很方便地对光线在变形几何中的反射和折射进行建模。这使得利用变形几何模型对光线的反射和折射进行建模非常方便。也就是说,同样的网格不仅可用于结构位移和温度的有限元计算中,并分配自由度,还可以在光线-边界相互作用时查询位置和法线方向。此外,由于光线能够与透镜上任一位置的温度场相结合,因此可以利用温度和光线的真空波长计算每条光线的折射率,以解决热光色散问题。

综上所述,COMSOL 多物理场仿真软件可以执行以下操作:

- 利用有限元法对热传导和结构变形进行建模;
- 使用辐射度方法对灰体之间的热辐射进行建模;
- 利用射线对发生热膨胀的透镜系统的光线路径进行追踪。

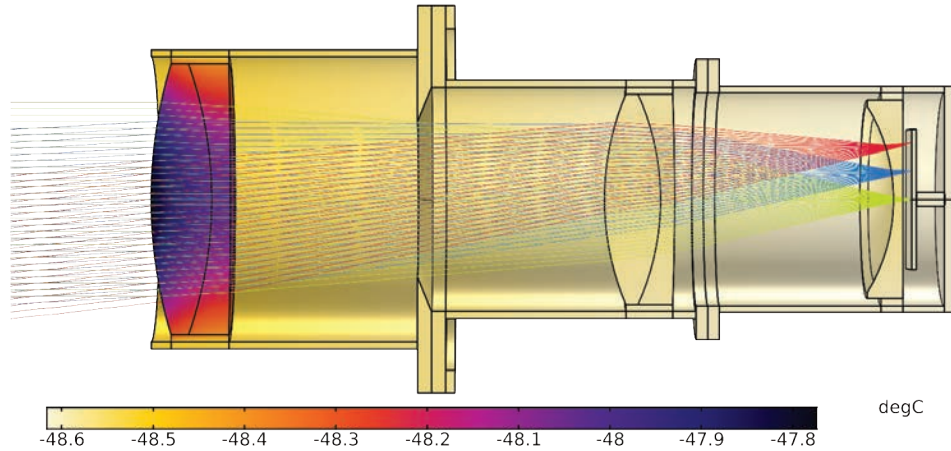


图4 三个不同视角下,发生热变形的 Petzval 透镜组和镜筒的入射光线仿真结果。

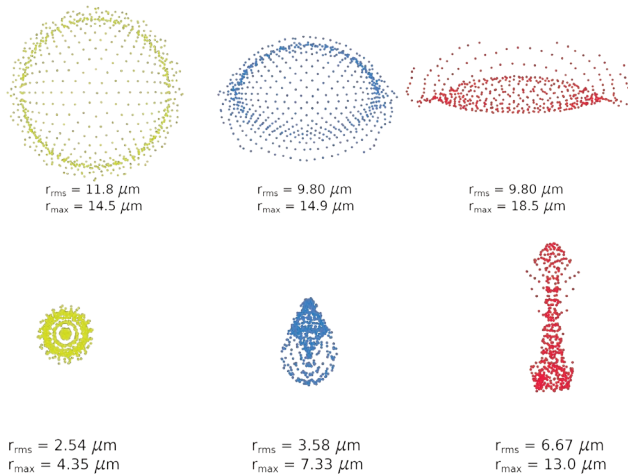


图5 Petzval 透镜系统在热真空室(上)和室温(下)环境中的点列图分布。

» 传热的仿真结果

传热仿真结果表明, Petzval 透镜组件中的透热窗口对温度的调节起着重要作用。图3显示了透镜组、镜筒和隔热罩中的温度。由于镜筒内的温度变化难以观察,因此绘制了沿着装置中心线变化的一维温度图。

如图3所示,由于周围环境(7)的热辐射,真空腔室(1)外部真空窗口的温度是最高的。透热窗口(2)的温度约为 $-30^{\circ}C$,远低于周围环境温度,但仍高于隔热罩(6)的内

部温度。透镜组(3、4和5)内的温度比隔热罩约低 $2^{\circ}C$ 。这表明透热窗口的存在是非常有必要的。如果没有透热窗口,透镜组与周围环境之间的温差可能高达 $20^{\circ}C$,而不仅仅只有 $2^{\circ}C$,这将导致更大的热应力。这与利用双层窗户对房间进行隔热的原理类似。

» 射线追踪的仿真结果

在三个不同视角下,使用射线追踪对 Petzval 透镜的热变形系统进行仿真。图4为入射光线的轨迹以及透镜组和镜筒的温度场仿真结果。

为了便于比较 Petzval 透镜系统在热真空腔室和室温($20^{\circ}C$)下的光学性能,可以创建点列图来显示像平

面中的射线分布。图5为在三个不同视角下,热真空腔室(上)和室温(下)环境中的点列图分布。

由图5可以看出,两种环境下的点列图明显不同,并且其均方根的值有显著差异,表明温度变化对 Petzval 透镜系统光学性能具有显著影响。

» 未来应用

使用 COMSOL 软件中的附加模块,可进行 STOP 耦合建模分析。近年来,越来越多的用户选择数值仿真软件进行建模分析。COMSOL 多物理场仿真软件的自主性和易用性,使其成为 STOP 耦合分析的有效工具。未来,仿真在光学系统设计中的应用将更加重要和广泛。◎

仿真优化同步加速器真空室设计

RadiaSoft 公司和阿贡国家实验室正在为增强同步加速器光束的亮度而共同努力。他们使用 COMSOL® 软件创建了一个仿真 App, 以简化同步加速器真空室的设计, 从而推动粒子加速器的研究进程。

作者 BRIDGET PAULUS

同步加速器是一种粒子加速器, 可用于多个领域的科学研究。由直线加速器和圆形加速器组成的加速器链可将电子束加速到极高的速度。当电子束进入存储环时会被强大的磁铁吸引进入圆形轨道, 同时辐射出与电子弯曲轨迹相切的 X 射线。辐射损失的能量必须在每圈旋转时通过放置在环上的射频腔来恢复。通过一组光学元件, 将光束从同步加速器中分离出来, 然后根据给定的实验和样品要求, 对 X 射线进行调节。

类似于“超级显微镜”, 科学家可以通过同步加速器发出的辐射观察不同的材料和化学过程。同步加速器可用于检查晶体的内部结构, 无损检测考古发现(如古代陶器), 或研究复杂的蛋白质结构等。然而, 尽管研究内容可能会有所不同, 但均要求同步加速器辐射出的光束能量尽可能地强烈。

为加快研究进展, 许多机构正计划增强同步加速器光束的亮度, 阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory)的先进光子源(Advanced Photon Source)也不例外(图1)。然而, 完成此项任务具有一定的挑战性。RadiaSoft 是一家利用仿真工具来设计粒子加速器的公司, 该公司的工程师 Nicholas Goldring 认为加速器的优化过程涉及多个物理场, 其中包括真空科学、磁场、热和粒子运动。然而, 即使是对加速器的单个组件而言, 其优化过程也可能非常困难。例如, 电子束穿过真空室时会产生复杂的物理效应, 这些效应之间会相互作用和影响, 并且其过程漫长而复杂。

为了研究受不同因素影响的加速器真空室, 在美国能

源部的支持下, RadiaSoft 公司和阿贡国家实验室利用 COMSOL® 多物理场仿真软件联合开发了一个同步加速器真空室的模型, 并创建了仿真 App。他们将该仿真 App 分发给世界各地使用粒子加速器的机构。

» 真空室的多物理场仿真

真空室(图2)是影响

粒子加速器有效性的关键组件。Goldring 表示, 真空室必须保持在毫微托的压力水平, 以使电子束运动时不受阻碍。压力过高会使气体粒子增加, 导致散射和束流损失。通常, 准确计算高温、同步辐射、放气和解吸作用等情况会比较困难, 尤其是当这些现象相互影响时。

因此, 粒子加速器工程师需要借助仿真软件来优化真空室设计。Goldring 表示: “传统仿真软件高度定制化, 而且往往只能模拟一个物理过程。”此外, 由于这些软件包几乎没有说明文档(即使有的话也很少), 因此, 在实际使用过程中难以掌握其使用方法, 容易造成相对

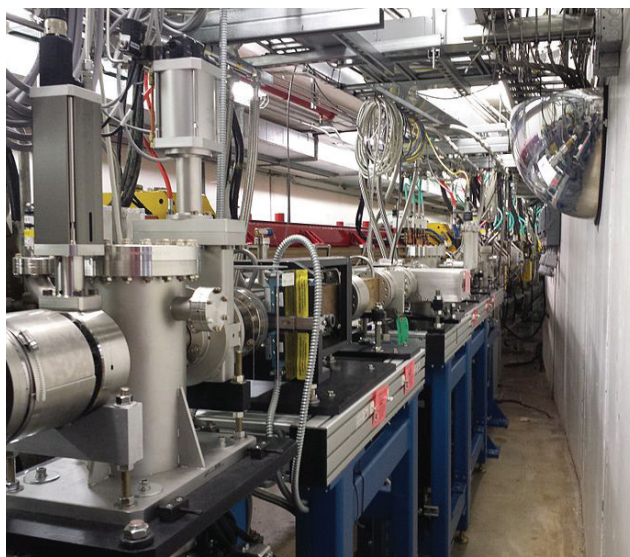


图1 阿贡国家实验室的先进光子源同步加速器。

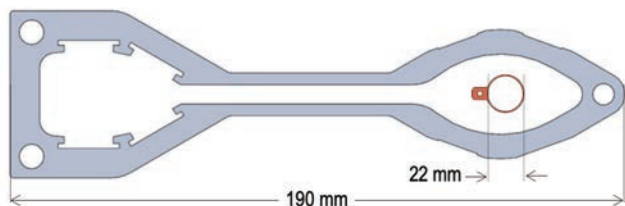


图2 真空室的二维轴对称几何结构。

孤立的工作环境。例如，一位工程师擅长射线追踪分析，而另一位则精通气体流量分析和压力计算。由于传统仿真工具功能单一，所以每位工程师只能对特定的更改进行测试，而测试数据需要在多个工具之间进行循环迭代才能完成设计。

为了简化工作流程，RadiaSoft 选择了 COMSOL Multiphysics® 软件中附加的射线光学模块和分子流模块进行分析。“COMSOL 软件的多物理场功能非常有用，它使真空工程师以更简单的方式执行重要的计算。”Goldring 说，“在同一个软件界面，它可以对多种复杂的现象进行建模。”

与其他软件相比，COMSOL 多物理场仿真软件还具有更强大的数据分析工具、更快的求解器等。Goldring 表示：“在对分子流进行模拟时，COMSOL 可以同时多种气体进行建模，这非常方便。”普通的加速器仿真软件通常一次只能模拟一种物质，而 COMSOL 不仅可以模拟多种物质，还能获得同样的精度。

Goldring 将使用其他软件模拟的结果，与在 COMSOL

软件中模拟真空中自由分子流的结果进行了比较，发现两者具有良好的一致性。

功能强大的粒子加速器仿真 App

RadiaSoft 公司和阿贡国家实验室使用 COMSOL 软件中的 App 开发器将真空室模型封装为一个仿真 App，使其更易于分析同步辐射光束的传播对设计的影响。“使用者不必理解模型的原理，就可以明白如何设置复杂的光线追踪。”Goldring 说道。他们可以通过仿真 App 定义光束的起始位置，创建磁体的几何形状，导入 CAD 几何图形，以求解压力、温度等物理量。

粒子加速器仿真 App (图 3) 可以解决多个物理场耦合的问题：如可以使用

射线光学分析同步加速器中辐射的传播，观察 X 射线击中真空室壁时，放出的气体对真空室压力的影响等。

用户还可以在仿真 App 中自定义参数，例如电子束源、束流的能量、电弧长度，以及偶极磁体的强度。单击仿真 App 中的“计算”按钮，就可以模拟出射线的路径和功率，以及真空室内的温度，并将结果可视化。对于粒子加速器工程师来说，仿真结果可为高能束流在不同位置的辐射功率分布提供有价值的参考，使他们能够探测束流在同步加速器中传播时的分布情况。

该仿真 App 还可以用来确定从真空室壁上解吸的气体量(图 4)。在真空室内，高能粒子束产生同步辐射，撞击在壁上时会导致气体分子逸出，影响真空室内的压力。然而，保持真空压力对于电子束的寿命而言至关重要。为了避免电子束失效，需要知道释放进入腔室的气体量的多少。

仿真 App (图 4) 还简化了计算过程。将射线追踪与将射线数量转换成壁上累计的光子通量密度的方程式相结合进行模拟，可以确定各种物质的解吸气体。利用入射能量通量设定自由分子

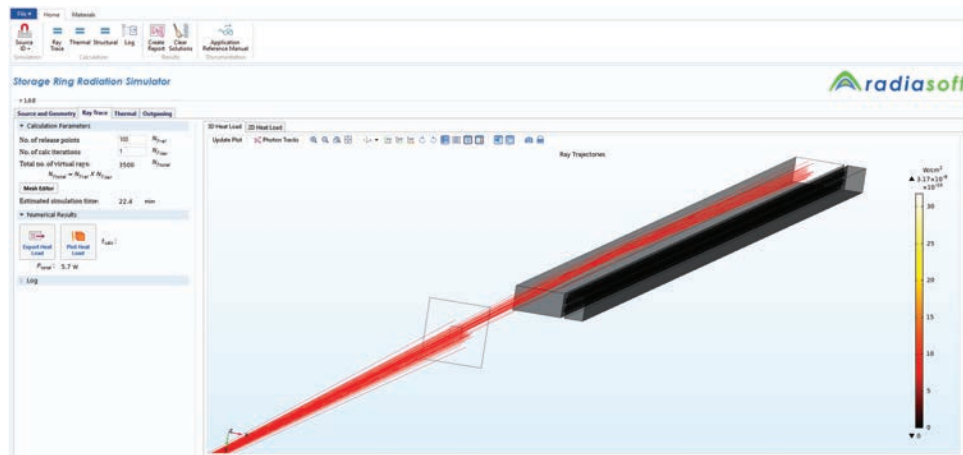


图3 分析真空中同步加速器辐射的射线追踪的仿真 App。

流模拟的边界条件,可以预测出真空室内气体分子的密度和压力。正如 Goldring 所说,“该仿真 App 可以导入通量曲线,然后根据气体性质和材料特性自动计算排出的气体量。”仿真 App 还可以同时模拟多种气体。

» 仿真 App 增强团队协作和反馈

在创建完一个仿真 App 后,Goldring 使用 COMSOL Server™ 将其分发给参与项目的其他合作者(图 5)。RadiaSoft 的 Paula Messamer 认为,通过创建并部署仿真 App,可以使真空室设计协作过程更加高效。“即使是专业知识水平较低的工作人员,通过使用仿真 App 就可以解决问题,而无需重新编程,也无需经历艰难的学习过程。”她补充说,“仿真 App 本质上更像一个计算器。”

通过部署仿真 App, RadiaSoft 公司还可以获得现场人员的反馈,从而根据用户需求自定义仿真 App 的界面。Goldring 表示,他们创建的仿真 App 不仅在阿贡国家实验室进行了测试,还在全球其他粒子加速器设施中进行了测试。

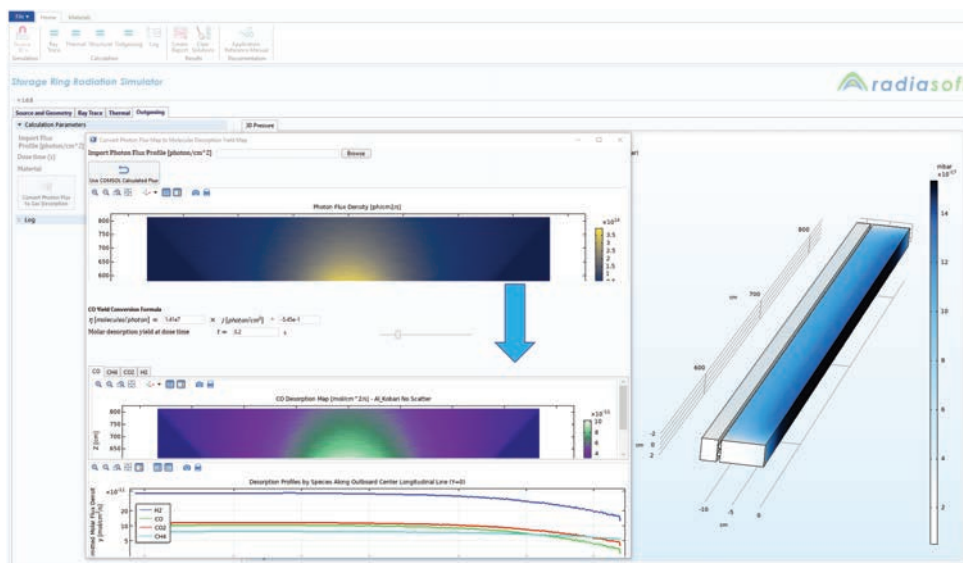


图 4 用于计算气体解吸量和压力的仿真 App。

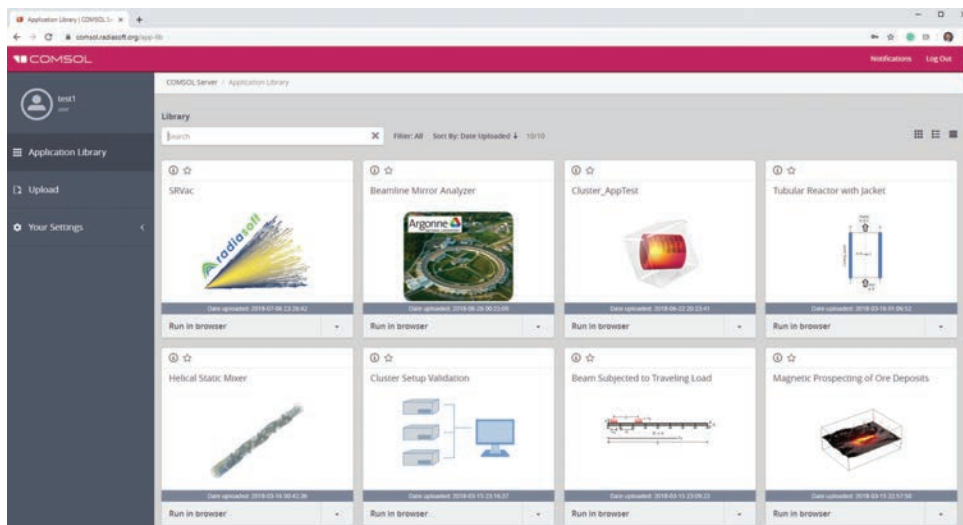


图 5 RadiaSoft 在 COMSOL Server™ 中部署的仿真 App。

» 未来计划

未来,Goldring 计划改进该仿真 App,使其具有可以导入任意几何形状的功能,这将使用户在测试和优化不同的真空室设计时更加轻松。此外, RadiaSoft 公

司还希望推广该仿真 App,以适应现有和未来不同类型的粒子加速器。

通过部署仿真 App, RadiaSoft 公司和阿贡国家实验室的团队为工程师提供了一种可以改进粒子加速器真空室设计的专用仿真工具。多物理场仿真及仿真 App 不仅能够优化真空室的设计过程,还可以提升粒子加速器的性能,并推动该领域的前沿研究和成像进展。🔗

仿真推动蜂窝移动通信市场迈入 5G 时代

作者 **ERIC GEBHARD**, SIGNAL MICROWAVE 公司副总裁

在移动通信行业,由 4G LTE 向 5G 过渡需要新的设计。在 4G LTE 中,机电元件已经趋向小型化设计,以满足功率、尺寸和质量的需求,从而提高系统的效率。在现有尺寸下满足 4G 射频要求的同时,允许工艺中存在一定程度的制造容差和选择不同的材料。

4G LTE 中通讯信号传输的最大频率约为 6 GHz,而 5G 则可将频率跃升至 40~70 GHz。在 4G LTE 标准中,当频率为 6 GHz 时,空气中的波长约为 50 mm。在 5G 标准中,当频率为 40 GHz 时,对应的波长约为 7.6 mm;当频率达到 70 GHz 时,对应的波长约为 4.3 mm。由下表可以看出,由于 6 GHz 对应的波长是 70 GHz 对应波长的 10 倍以上,因此工程师在设计时,需要减小元件尺寸。而为了解尺寸减小的范围,则需要对系统中所有的元件进行仿真分析。

标准	频率/GHz	空气中的波长/mm
4G LTE	6	50
5G	40	7.6
5G	70	4.3

在设计元件时,需要考虑以下问题:

- 尺寸需要多小?

- 允许存在多大的制造容差?

- 目前选择的材料是否合适?

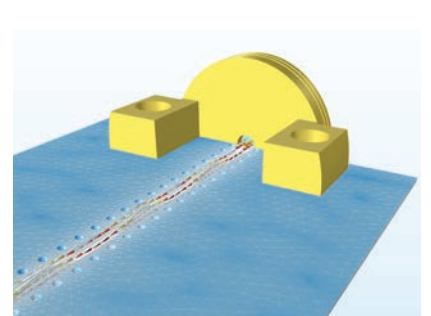
要解决上述问题,可以在设计时使用数值仿真工具来研究,而无需制造样机并进行测试,以节省时间和费用。5G 技术的出现,推动了仿真工具的应用。

通常,元件设计的经验法则为:如果元件的尺寸小于波长的 10%,即可将其简化为集总元件。在 4G LTE 中,可将小至 5 mm (即频率为 6 GHz 时波长的 10%) 的元件视为一个电路中的直流集总元件。随着 5G 技术的发展,任何大于 0.76 mm (频率为 40 GHz 时) 和 0.43 mm (频率为 70 GHz 时) 的元件都应被视作射频元件进行建模。因此,为了满足性能要求,必须制造比以前尺寸更小、容差要求更严格的元件。

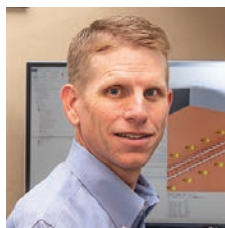
COMSOL Multiphysics® 仿真软件可以帮助工程师实现 5G 技术所需要的更高频率。通过开发简单的模型,对不同的元件尺寸、容差及材料等参数进行评估,工程师可以了解这些参数之间

的相互影响,以及参数变化将如何影响元件性能。这是建立模型数据库的第一步,该数据库可用于模拟更大、更复杂的元件和设备。随着建模工作的深入,还可以添加更多的物理场(如热流和机械应力等),以深入了解这些设计在实际工作过程中的运行情况。

由 4G LTE 迈入 5G 的过程极具挑战,设计人员需要更深入地了解元件的各个参数对设备性能的影响。COMSOL Multiphysics® 软件是一个优秀的仿真工具,它帮助蜂窝移动通信市场加速迈入 5G 时代。🔗



使用 COMSOL Multiphysics® 仿真软件建立的连接器模型。



ERIC GEBHARD, Signal Microwave 公司副总裁,1995 年获得亚利桑那州立大学理学学士学位。他在航天及射频领域具有 20 余年工程和管理经验。近 10 年来,他致力于使用 COMSOL 多物理场仿真软件研究射频连接器。