

COMSOL NEWS

电力行业专辑

高压输电

仿真优化高压输电线路设计

P 24

多物理场仿真及仿真 App 推动电力行业发展

欢迎阅读《COMSOL News》电力行业专辑！

如果您像我一样，热衷于在高压实验室中进行各种测试，那么，我们常常会面临一个共同的问题：我们的设计管用吗？它能按我们所想的运行吗？事实上，它并不总是能符合预期。一旦错误指示灯开始闪烁，或者当听到“砰”的一声巨响，亦或是闻到奇怪的味道时，意味着一切都得重头再来。

尽管实验室中的工作最终可以获得成功，但在建造原型和进行实验之前对设计进行建模和仿真，可以节省时间和资金。本期《COMSOL News》介绍了电力工程师使用多物理场仿真进行产品开发的各应用案例，包括电力变压器、电缆系统、输电线路和电力电子设备，等等。

在电力行业，仿真技术也可以为研发和工程部门以外的用户创造价值。在这个蓬勃发展的行业，仿真 App 为我们带来了更多的机遇。本期杂志为您展示了 ABB 集团、Cornell Dubilier 公司，NARI 集团以及其他公司通过仿真取得的成就。



Bernt Nilsson
COMSOL



扫描上图二维码
关注 COMSOL 微信

参与 COMSOL 社区互动

COMSOL 博客 cn.comsol.com/blogs

用户论坛 cn.comsol.com/forum

微信 COMSOL-China

微博 COMSOL 中国

我们期待您对本刊的意见和建议，欢迎通过 info.cn@comsol.com 与我们联系。

COMSOL NEWS

© 2020 COMSOL 版权所有。COMSOL、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联，亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 cn.comsol.com/trademarks。

目录

电力电子

- 4 | 高性能功率器件设计
——高性能功率器件模组与多物理场仿真

电力设备

- 6 | 大型变压器噪声分析
——ABB 持续推动变压器行业的发展

地下电缆评估

- 10 | 电缆网络的热管理
——英国国家电网模拟地下电缆线路

雷击防护

- 13 | 风力发电机的雷击防护
——多物理场仿真保障雷击环境下风力发电机的安全运行

高压电缆

- 16 | 新型电缆设计
——仿真软件为电缆行业带来巨大变革

磁力联轴器

- 18 | 发电机传动系统
——磁力传动技术延长海上风力发电场的使用寿命

电容器设计

- 21 | 非标电容器设计
——仿真 App 加速定制电容器的设计进程



封面图片

高压输电线路末端装置。
图片由 POWER Engineers 公司的 Danny Frederick 和 Charlie Koenig 提供。

专题文章

高压输电

- 24 | 输电线路的绝缘子设计
——仿真技术使输电线路性能最优化

绝缘开关

- 26 | 高压开关 GIS 设计
——大型电气设备性能的仿真优化

变压器散热

- 29 | 变压器与电抗器设计
——仿真推进电力变压器与并联电抗器更新换代

核能发电

- 32 | 核聚变发电机设计
——高性能核聚变发电机的结构完整性评估

发电机断路器

- 34 | 发电机断路器优化
——多物理场仿真为发电厂提供安全保障

电弧放电

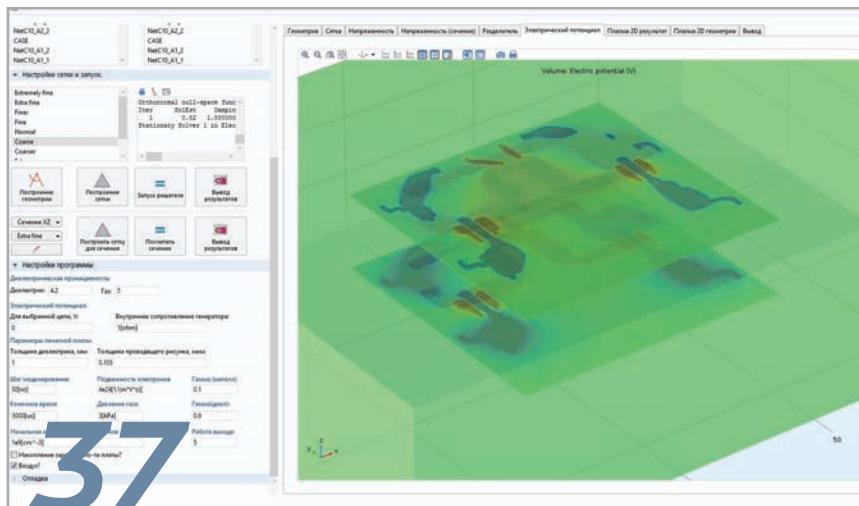
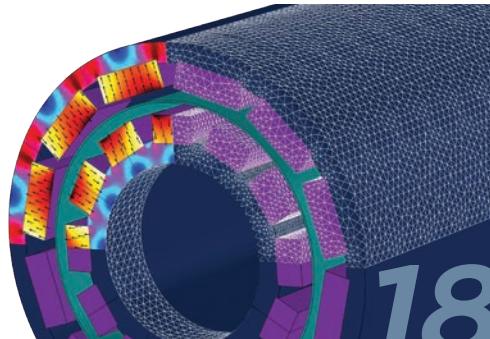
- 37 | 电弧模拟
——找出卫星系统中的电弧区域

产品设计及高性能计算

- 40 | 大规模集群计算
——借助高性能计算仿真优化大功率电子器件

电缆维护

- 42 | 电缆的水树分析
——仿真 App 助力电网的运行与维护



高性能功率器件设计

——高性能功率器件模组与多物理场仿真

极端环境和高电流为电力电子行业的设计人员带来了挑战。Wolfspeed 公司使用多物理场仿真开发了新的封装以改进电力电子设备的性能和热管理。

作者 **LEXI CARVER**

⇒ 电力电子设备中热管理的再思考

电力电子行业为数十亿的用户提供了新潮汽车、智能手机、平板电脑,以及其他各种无线设备产品。热管理会极大地影响这些设备的性能,例如,若温度高于指定工作条件,就可能出现过热,或造成电阻上升、切换频率降低以及阈值漂移等问题。所有这些效应都会导致设备效率及可控性的降低,最终造成设备故障。在当今电子产品更趋向于小型化、轻量化的潮流下,热管理问题也变得更具挑战性。

因此,对于可以控制传热和电流的功率器件模组的需求在不断上升,从而使电子设备能够在较高的频率和温度下稳定运行。Wolfspeed Cree 旗下公司

的工程师们正在开发一种新的功率器件模组,希望使其稳定性和灵活性能优于当前市场上的其他产品。他们面临的最大挑战是使热阻及会造成电压尖峰的寄生电感最小化。为改进热管理及延长产品寿命而开发的这种新型功率器件模组(图1)包括裸芯片(器件)、触点、互联、环绕外壳以及基底组件。

⇒ 通过仿真节省时间和资金

对 Wolfspeed 公司的资深工程师 Brice McPherson 而言,COMSOL Multiphysics® 是一个非常有用的仿真工具,它可以极大地节省设计阶段的时间和费用。他的新设计基于两种宽禁带半导体:氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC),可以在较高的频率和温度下稳定工作。



图1 新型 Wolfspeed 功率器件模组。整个器件略大于 25 美分硬币。

在尝试找出几何结构和材料属性的最佳组合,有效优化质量、切换频率及密度的过程中,仿真是必不可少的组成部分(图2)。“Wolfspeed 专注于大功率密度产品,需要在设计完善前进行许多精密测试。因此能在正式投入资金和时间制造原型机和产品之前对设计进行模拟,将非常有价值。” McPherson 评论道。

McPherson 使用 COMSOL® 软件模拟焦耳热,分析导体产生的热量,以及研究集合改变带来的影响,如基底和底座厚度。他还使用软件的参数化扫描功能研究热阻随基底导热系数和器件尺寸的变化。“通过参数化模拟,你可以精确地找出对系统影响最大的参数,并在性能、复杂度和成本之间找到一个最好的折中方案。”他补充道。

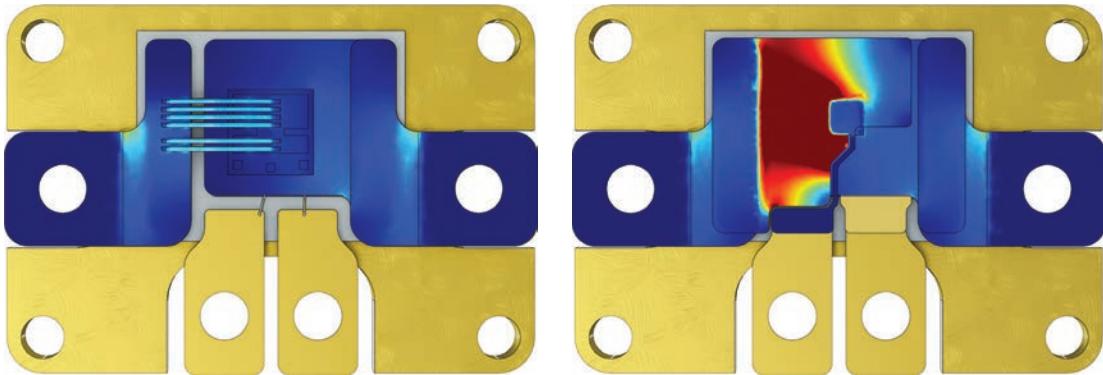


图2 仿真结果显示了 SiC (左) 和 GaN (右) 功率模块中的电流密度。SiC 电源中的电流密度较低 (适用于大电流),且电流主要集中在焊线中。GaN 电源的平均电流密度较高,但可以提供更大的导电区域 (适合较小的电感)。

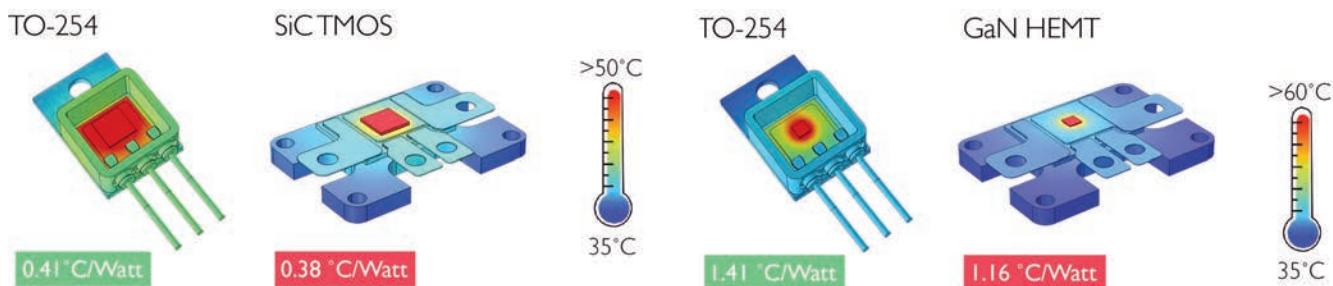


图3 TO-254 与 McPherson 设计的电源组的热阻结果对比。SiC (左), GaN (右)。

⇒ 仿真结果促成半导体解决方案

McPherson 使用 COMSOL Multiphysics 成功优化了功率器件模组的热和电性能。他的仿真结果(图 2)显示,两款新设计的功率器件的电感和热阻均低于常见的 TO-254 型商用晶体管。通过施加不同的温度和电压边界条件,分析由此产生的电感、热阻和电流密度,并据此调整设计以优化载流量和面积。利用多物理场仿真最终设计的 Wolfspeed 功率器件模组,不仅极大地改进了热管理,还可以在更为严苛的环境下工作,如超过 225 °C 的高温环境。

⇒ 与整个团队分享仿真

COMSOL Multiphysics 还是一个应用程序设计系统。McPherson 利用 COMSOL 软件中的“App 开发器”将他的仿真模型转换为一个仿真 App,因此能更轻松地与同事分享仿真模型结果,包括那些没有工程背景的同事。他的最新仿真 App 研究了焊线的载流量和熔断电流(图 4),焊线是用于连接半导体器件与类似新型 SiC 和 GaN 模块的小电线。“我们必须时刻关注通过这些焊线能传输多大的电流。……这在很大程度上取决于焊线和回路的几何结构。”McPherson 解释道,“现在,我们可以使用一个简洁的仿真 App 来

获取数据,无须加入其他设计过程。我们撰写了许多计划书,通常需要一位工程师花费一整天的时间进行首回合分析。……‘App 开发器’在这方面也非常重要。”

使用 COMSOL Server™ 许可证,可通过任意主流的网络浏览器运行 McPherson 的仿真 App。用户可以

轻松地使用 McPherson 的仿真 App 确定最大允许电流,查看焊线数量对峰值温度的影响,以及确定在指定电流输入、温度和几何设定下所需的给定直径的焊线数量。借助多物理场仿真及仿真 App, McPherson 轻松地实现了对 Wolfspeed 电力电子设备中功率器件模组热管理的重新设计。❖

“能在正式投入资金和时间制造原型机和产品之前对设计进行模拟,将非常有价值。”

— BRICE MCPHERSON

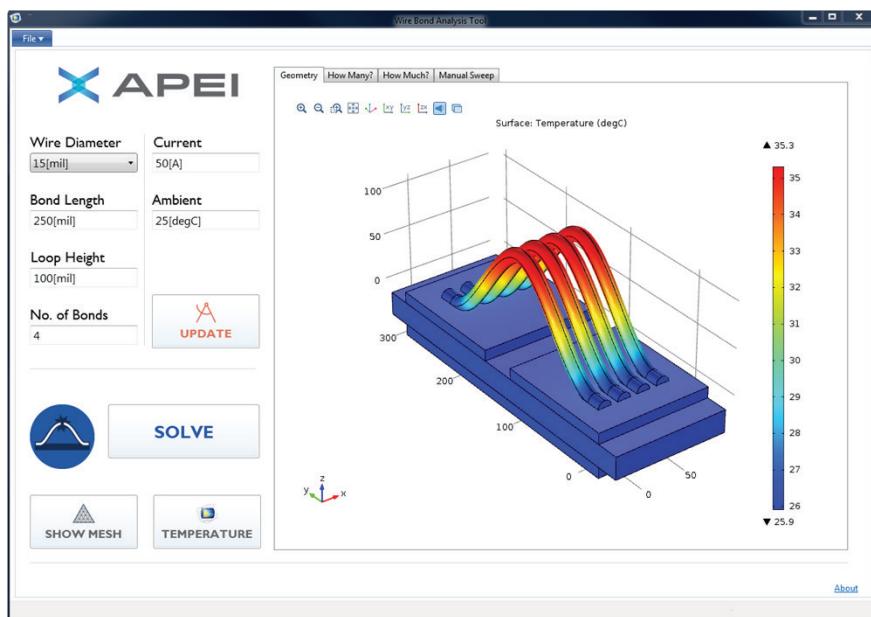


图4 仿真 App 显示了焊线中的温度变化。终端用户可以更改焊线长度、回路高度、电流水平以及焊线数量。



大型变压器噪声分析

——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通过测试来降低变压器工作时发出的鸣扰, 这一过程会产生高额的费用成本。在 ABB 集团, 一个工程师团队正通过开发多物理场仿真模型与定制仿真 App 来加深他们对变压器设计的理解。

作者 **LEXI CARVER**

不论是烧菜做饭还是给手机充电, 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。

这其中就包括用于改变交流电输电线路中电压等级的电力变压器 (图 1)。

电压越高, 功率传输时的损耗越低, 所以高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”来进行虚拟设计检查、测



图1 高压输电中使用的变压器。

试各种配置,并通过基于模型开发的定制化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(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。可以通过改变线圈匝数来调节电压。

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会产生振动。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(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伦兹力,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,瑞典韦斯特劳斯市(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 COMSOL Multiphysics 进行研究,是因为它能够将多个物理场轻松地耦合在一起。”ABB 集团研发中心的科研人员 MustafaKavasoglu 说,“因为项目需要模拟电磁学、声学和力学,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 CRC 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

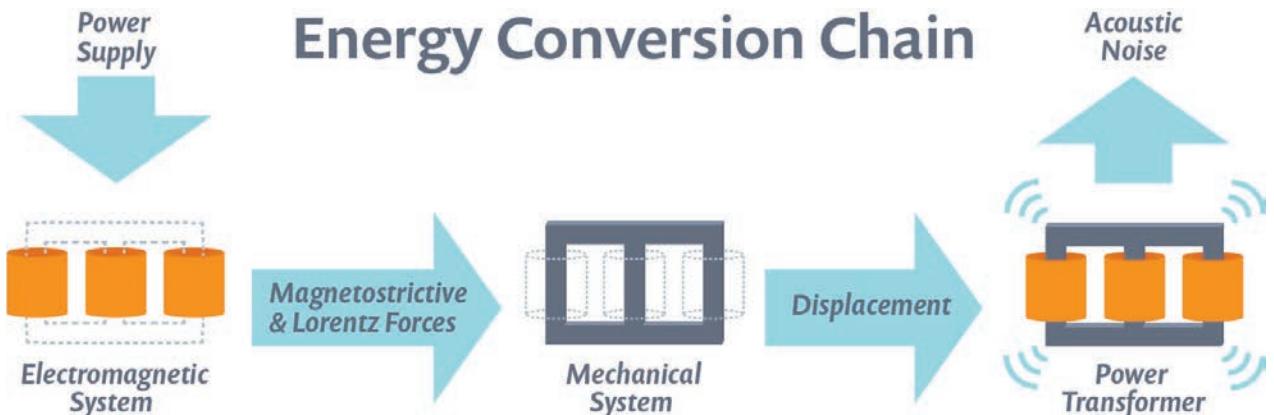
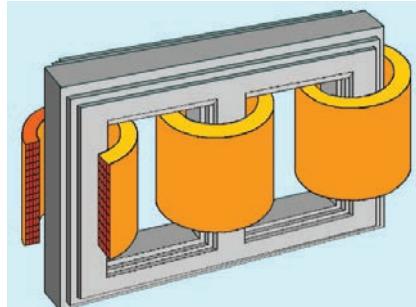


图2 三相变压器中器身装配的 CAD 模型,绕组环绕铁心安装(左上)。在装有绝缘油的外壳中安装电力变压器的器身装配(右上)。发出铁芯噪声及载荷噪声的能量转换链(铁芯的磁致伸缩和绕组中的洛伦兹力,下)。

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。

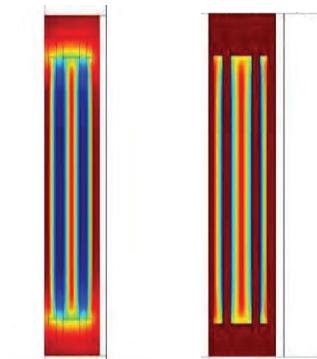


图3 仿真结果显示了变压器线圈绕组中的磁通密度(左)和洛伦兹力(右)。

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(图3左)中产生的磁通量、绕组中的洛伦兹力(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,“磁致伸缩应变

“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。”

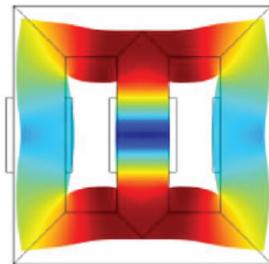
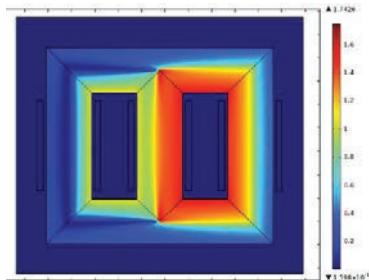


图4 COMSOL®软件结果显示了钢制铁芯中的磁通密度大小(左);铁芯的共振结果(为清晰起见,放大了变形部分,右)。

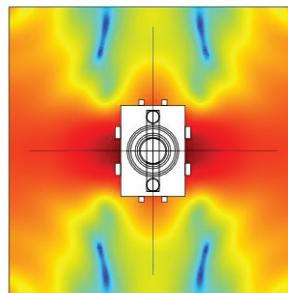
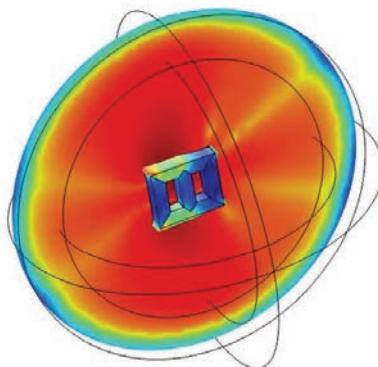


图5 铁芯(左)和变压器(右)周围声压场的声学分析结果。

很容易激励出谐振,并会放大这些频率下的振动(图4)。”

由此,他们将能够预测声音在绝缘油中的传播,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(图5)。

研究人员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(图6)。

他们还通过参数化研究分析了设计参数(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,据此调整了几何结构、铁芯、绕组和外壳的设置,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通过持续使用 COMSOL 软件加深了他们对变压器设计的理解,并改进了模型,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仿真 App,并根据各部门的需求轻松地进行定制。

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

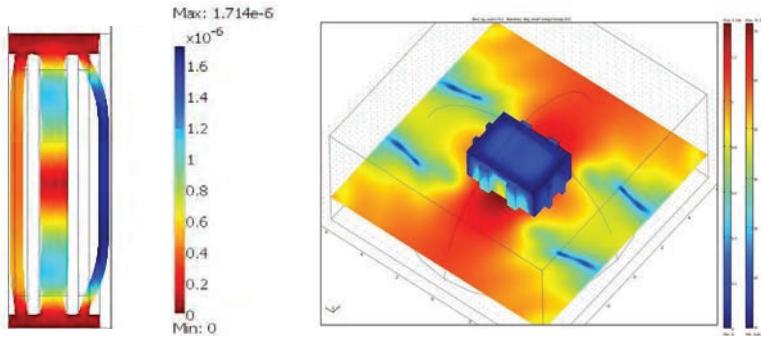


图 6 绕组的位移仿真结果(为清晰起见, 放大了变形部分, 左); 外壳外部的声压级及外壳壁的位移仿真结果(右)。

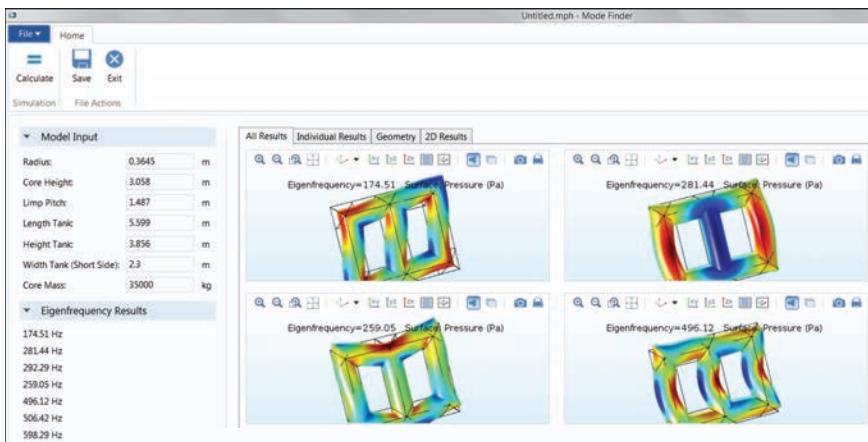


图 7 用于计算变压器铁芯特征频率的首个仿真 App。左侧的选项卡栏为模型输入项; 右侧将显示特征频率的计算结果(为清晰起见, 放大了变形部分)。

于统计数据 and 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 中的仿真 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。仿真 App 中包含在 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 说道。

“除了成本因素, 还有时间方面的考虑。新的仿真 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。”

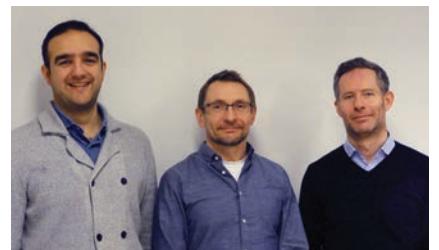
用户可以很方便地在定制的仿真 App 中查看会造成变压器鸣扰的特定几何结构、材料属性和其他设计参数组合。“我们慎重地选出了允许用户访问的参数, 主要是一些最重要的参数。” Kavassoglu 补充道。

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与其他研发工作。‘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仿真 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仿真 App 中获益。” 仿真专家可以通过在本地安装的 COMSOL Server 管理并部署他们的仿真 App, 用户则能通过客户端或网络浏览器进行访问。

该团队目前正努力开发另一个用来计算载荷噪声的仿真 App。在业务部门中, 该仿真 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 Kavassoglu、Romain Daneryd 和 Anders Haettel。

电缆网络的热管理

——英国国家电网模拟地下电缆线路

仿真技术可准确预测地下电缆的安全额定值范围, 使英国国家电网能够增加可靠的电力供应并降低运营成本。

作者 **JENNIFER HAND**

当住户高兴地为新购的娱乐设备或厨房电器接通电源时, 若问及他们对家庭用电有何期望, 答案很可能会包含这几个词汇: 安全、可靠、便宜。

对电网运营者来说, 管理电网意味着要满足全天候的用电需求, 要将电网电压和频率维持在允许范围内, 这是保证用电安全、可靠以及电价实惠的根本。在英格兰和威尔士, 管理电网这一职责由英国国家电网承担, 该公司拥有并负责建造、维护和运营高压输电网, 保障家庭和企业用电。图 1 为电网中的一段高压地下电缆系统。

英国国家电网面临着不少挑战: 提高规模庞大的电缆网络的热管理能力, 优化新电缆的铺设路线, 以及准确评估电缆额定值。有时在维修旧部件时会使用新材料, 就会出现同一电缆线路中不同材料混用的情况, 这时尤其要确保电缆安全额定值的准确性。应对这些挑战并不容易, 运营者不仅需要全面了解周围土壤对电缆的影响、电缆使用年数及维修情况, 还要考虑电缆对临近区域电缆性能的影响。

⇒ 面对的挑战

在计算电缆的额定值时, 大多数传输与配电网采用的是由国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 颁布, 并获得国际大电力系统委员会 (International Council on Large Electric Systems, CIGRE) 认可的标准。所谓电缆额定值, 是指在正常工作温度区间并且不会引起潜在损害的前提下, 电缆所能承受的最大负载。

网络测绘工程师 David Scott 隶属于英国国家电网资产完整性部门, 负责架空与埋地电缆性能的维护工作。他解释说: “测量高压系统电缆的额定值并非易事。这些高压电缆深埋于地下, 最深可达 50 米, 随着电缆向前延伸, 其周围泥土的温度可能会随电缆长度发生变化。而且这些电缆并不是孤立存在的,

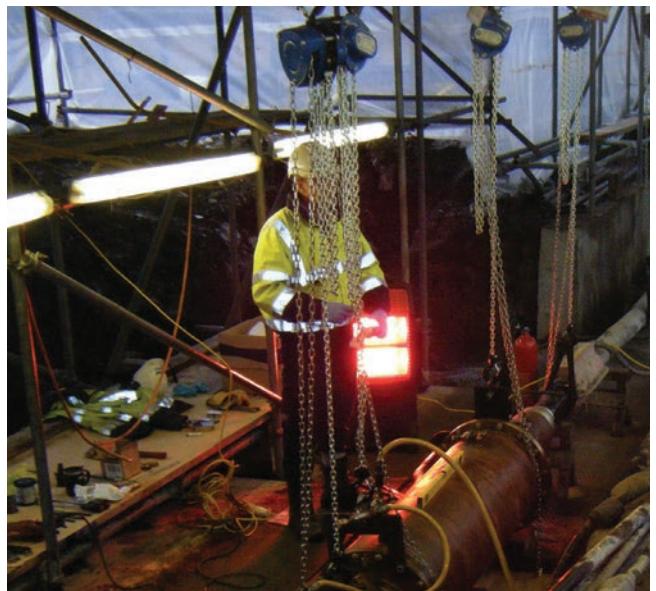
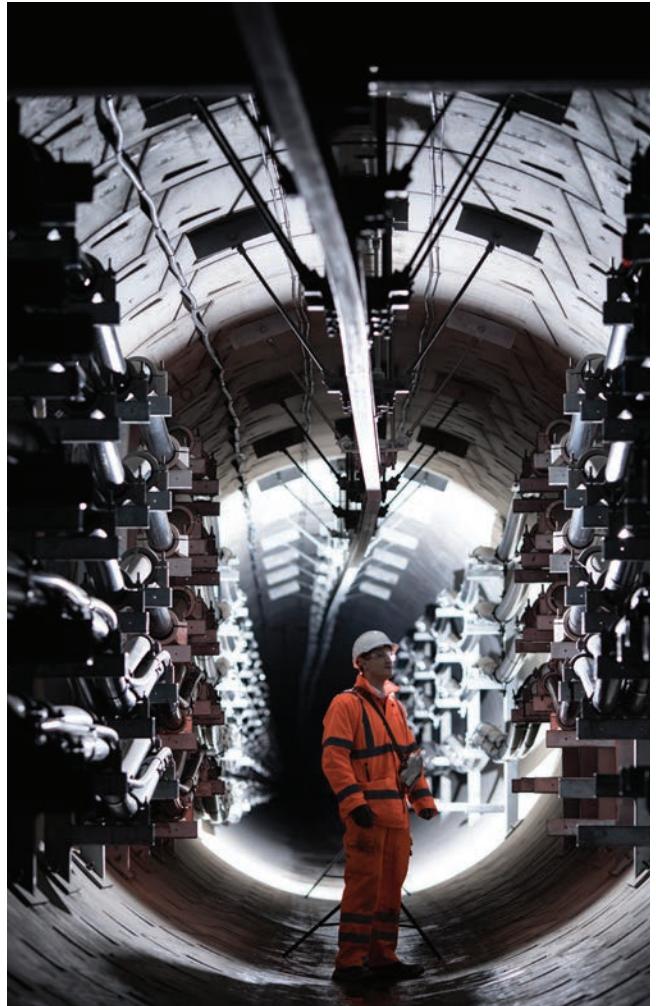


图 1 一段穿过隧道(上)和埋于地下(下)的高压电缆系统。

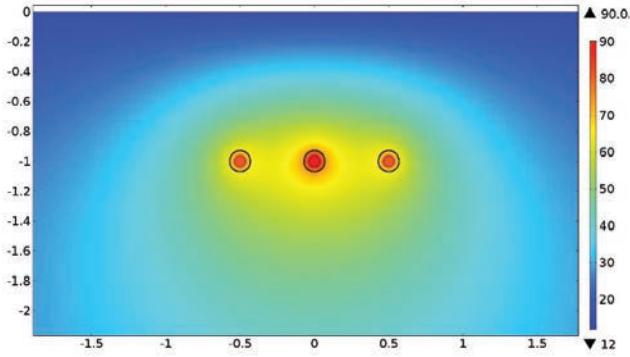


图 2 仿真结果显示了土壤中电缆的热分布。

它们是大型电力系统的一部分,因此附近还会有其他电缆,或者铁路电网电缆等。当周围电缆横穿过去,或者只是并行通过,只要距离接近,就会改变所测电缆的热负荷。因此想获得有效的测量值非常困难。我们一直在寻找更准确的方法来测量电缆额定值。”

英国南安普顿大学 (University of Southampton) 的托尼·戴维斯高压实验室 (Tony Davies High Voltage Laboratory, TDHVL) 与英国国家电网公司合作开展了一系列创新项目研究。该实验室率先建立了不同电缆组件的模型,并使用仿真分析来理解电缆组件在环境变化与使用时长影响下的性能变化。

TDHVL 与英国国家电网的研究合作始于经验模型的建立。TDHVL 的工程师与英国国家电网密切合作,并使用 COMSOL Multiphysics® 软件进行有限元分析 (finite

element analysis, FEA)。研究人员将关注重点放到了热传递上。他们首先验证了特殊类型电缆的额定值,然后开始分析处在孤立状态或不同环境等特定状态下的电缆 (图 2)。

土壤湿润时,热量消散得较快。干燥的土壤导热较慢,因为其中充满的微小气穴会阻碍热量的散失,而这会影响电缆的热性能 (图 3)。在模拟铺设电缆的沟渠时,研究团队将土壤干燥度和开裂程度也考虑了进来。“对于模型中的土壤和专用回填材料,我们都有参数设置标准。不同的土壤参数会对模拟结果有较大影响,我们通常会选取一个最不利的数值,来代表土壤给电缆带来的负面影响。” Scott 解释说。

⇒ 热与电的分布

对于英国国家电网而言,

建模工作的成果带来了崭新的前景,尤其是评估紧密布设电缆的额定值和优化新建电缆路线的配置时,仿真提供了全新的思路。例如,两根电缆距离过近会影响热量的消散,从而导致电缆的温度升高,载流能力下降。但有时也会遇到评估结果过于谨慎的情况。“我们发现,基于标准的各类方法在评估电缆额定值时,得到的结果通常较为保守。如当两根电缆实际相距 100 米时,彼此之间的相互作用几乎可以忽略不计,所以我们可以用这类方法给出过热警告。” Scott 表示。

他的团队利用相关的 COMSOL 模型来确定在现有线路基础上铺设新电缆时,是否能够符合安全标准,以及电缆铺设的最佳位置 (图 4)。“仿真让我们受益良多,现在我们能够为新系统的设计及其对现有网络的影响提供准

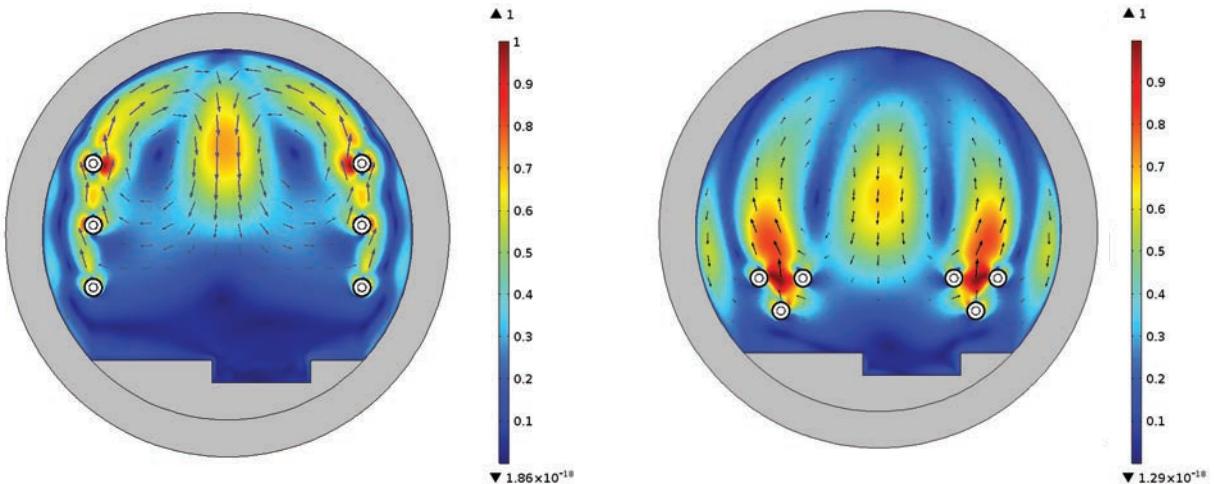


图 3 水平铺设的长隧道横截面内归一化的气流分布仿真结果。

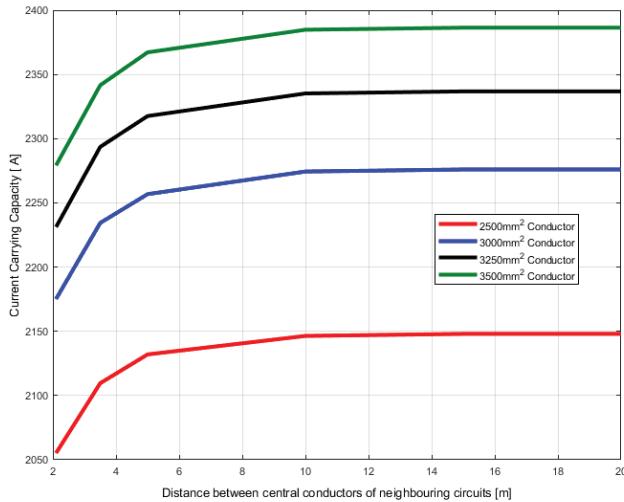


图 4 COMSOL® 模型显示了四个具有相同载流能力的电路，区别仅在于它们与相邻电路的距离不同。



图 5 将分段电缆连接在一起的安装接头。

确的反馈。” Scott 评价道。

“以前我们只能采取一些特定的措施以减小电缆干扰，通常是要求第三方将电缆铺设得更远一些或埋得更深一些。但埋得太深会让电缆的性能大打折扣；若想把电缆铺设得更远一些，就会对土地面积提出很高的要求，这会使电缆的安装成本变得相当高，对于土地有限的城市来说，这一要求也非常不现实。借助仿真，我们可以更清楚地了解电缆铺设后的真实情形、实际的电缆额定值，以及可能出现的状况。”

旧电网系统的维护工作还向运营者提出了另一个难题：旧备件毕竟有限，维修时始终使用旧备件不现实。如果使用新备件，就可能造成一个系统中不同材料的混用（图 5）。许多旧电缆采用铅制的外护套，新电缆却往往使用铝制的。为了控制维修成本，我们自然愿意只更换损坏的零件。然而，许多电缆系统在设计时都力求将感应电流降到最小，从而保障电缆载流量最大化。如果在维修过程中混入了不同的材料，可能就无法达到设计之初的要求了。现有的工业标准并没有考虑使用不同导体的情况。我们可以使用 COMSOL 计算电缆损耗，根据具体的材料组合，判断需要采取怎样的对策。

“借助 FEA，我们可以更清楚地了解电缆铺设后的真实情形、实际的电缆额定值，以及可能出现的状况。”

—— DAVID SCOTT, 英国国家电网公司测绘工程师

⇒ 可靠结果, 明智决策

Scott 向大家公开了新建传输电缆的费用：400 千伏的埋地电缆每公里的铺设费用约为 2000 万英镑（约 1.8 亿元人民币）。听到这个数字，仿真的价值瞬间明晰起来。如果一项即将动工的工程涉及安装电缆，那么精简资产设计和最大化电缆容量便是降低成本的首要任务。利用仿真获得的信息，我们可以放心地选择那些埋得更浅一些、但布线更复杂的埋设方案。对于那些建在类似伦敦市中心这样拥挤地带的电力传输系统来说，因为基本没有可以水平延伸的空间，因此通过仿真所获得的信息就更有价值了。

未来我们可以在考虑高压设备（包括地上电缆）的生命周期、兼容性和连接性的基础上，利用建模制定与

之相关的决策，类似的创意层出不穷。“如果可以模拟高架电线周围的风和空气温度，并在给定时间内加上系统负荷，我们就拥有了尽早发现潜在问题的有效方法，例如预测线路表面污染物的凝结位置。” Scott 解释道。仿真还可以用来排查电缆接头由于疲劳循环或机械损害而产生的问题，并预测此配件可能出现的故障模式。

Scott 补充道：“我们能够专注于实际的物理问题，而不必陷于复杂的数学计算中。使用 TDHVL 创建的仿真模型，我们不但可以调整关键参数，探讨不同的设计方案，而且能够确信得到可靠的仿真结果。事实证明，只要确保输入参数是准确的，仿真结果的可靠性就毋庸置疑。在电缆铺设和维修方面，仿真总能帮助我们做出明智的决策。” ❖

风力发电机的雷击防护

——多物理场仿真保障雷击环境下风力发电机的安全运行

美国 NTS 公司的工程师借助多物理场仿真揭示雷电击中风力发电机时的奥秘。

作者 GARY DAGASTINE

随着全世界不断减少对化石燃料的依赖, 全球的风力发电市场迎来蓬勃发展, 在未来几年, 其年均市场规模预计可达到 700 亿美元。风力发电规模如此之大, 可谓是一项伟大的成就; 然而, 一股强大的力量正在成为该产业发挥全部潜力的障碍: 雷电, 这是自然界最具破坏性的力量之一。

雷击是引起风力发电机意外停机的最主要原因, 它不仅带来数以兆瓦计的电力损耗, 还会产生巨大的运行和维护成本。

由于风力发电机拥有巨大的旋转叶片、高耸入云, 并且长期暴露在自然环境中, 因此特别容易遭受雷击。闪电几乎可以直接或间接地对风力发电机的所有组件造成严重破坏, 包括叶片、控制系统和其他电子元器件。然而, 由于后勤条件的限制, 不仅维修费用高, 实际的维修操作也是巨大考验。

NTS 的子公司 Lightning Technologies 是复杂防雷系



统设计与验证的全球领导者, 主要面向航空航天领域, 包括飞机、航天器和发射设备; 同时还为风力发电场、工业中心、高尔夫球场、主题

图 1 NTS 运营的高压发生器 (2.4 兆伏的马克思发生器)。

公园以及其他高风险场所提供专业服务。

国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 是国际性电工标准化机构, 他们制定了叶片的耐雷击水平和防雷击要求; NTS 工程师一直是其分委员会的积极成员。工业标准 IEC 62305 要求风力发电机制造商在叶片制造中加入雷击防护设计。为了提供最有效的保护, 工程师必须能够判断当叶片遭受雷击时, 其中流过大电流, 以及准确的电流流向。但问题是, 对雷击电流特性的简单假设得出的结论往往并不准确。

⇒ 深入剖析雷电流

在美国马萨诸塞州皮茨菲尔德, 一栋约 1672 平方米的建筑设施中, NTS 运营着世界上功能最齐全的雷电模拟实验室之一, 高约 4.3 米和 7.6 米的闪电发生器伫立其中, 可产生高达 2.4 兆伏的电压 (图 1)。

几十年来, NTS 一直致力于风力发电机叶片保护系统的设计和研发。由于风力发电机叶片为翼型, 该公司可以将航空航天应用方面的深厚知识基础直接应用到这一领域。

NTS 皮茨菲尔德 (Pittsfield) 分公司模拟分析团队的负责人 Justin McKennon 表示, 传统的风力发电机是通过添加表面保护层 (surface protection layer, SPL) 覆盖采用轻质、高强度碳纤维复合材料制成的叶片, 用以实施保护措施。SPL 一般由导电网构成, 可将叶片上雷电“附着” (雷击) 点的电流安全引至地面。

“很多叶片结构都包含与表面保护层平行排列的碳纤维结构层, 它们叠加起来形成碳层, 并沿叶片长度在碳堆叠层和 SPL 之间建立了周期性电连接。这样做是为了防止在两者之间产生过高的电压差, 因为一旦出现高压差, 就可能产生电弧, 进而损坏叶片。电

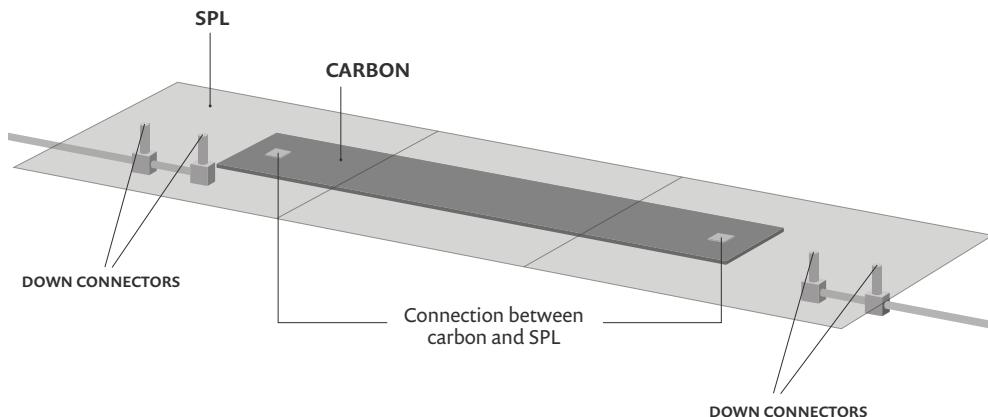


图2 碳堆叠层上方覆盖的薄型铝表面保护层(SPL)的几何结构。

图注：SPL - 表面保护层；CARBON - 碳层；DOWN CONNECTORS - 引下线连接；Connection between carbon and SPL - 碳层与 SPL 之间的电连接。

连接虽然可以降低电压差,但也会使电流流入碳纤维复合材料,这无形中增加了叶片的设计难度。”McKennon 解释说。

确定碳堆叠层对不同电流的负载能力,预测可能出现的雷电附着点和击穿的可能性等因素,这些并不是无关紧要的小问题。McKennon 解释说,叶片物理测试的成本(有些叶片长达70米甚至更长)十分昂贵,对雷电效应进行数值模拟已经成为设计过程中的一个关键环节。

McKennon 表示:“由于雷电现象涉及的物理场非常复杂,工程师很容易做出不恰当的假设,从而在很大程度上影响模型的准确性。”

⇒ 仿真减少过度设计

人们常常容易做出这样一个错误假设:碳堆叠层的电导率在各个方向都是相同的。而实际上,碳纤维的电导率在不同方向上可能截然不同。

在图2显示的几何结构中,碳堆叠层上方5毫米处覆盖了由铝片制成的SPL导电网,其厚度约为500微米,电导率根据实验测量值进行设置;碳纤维的电导率同样采用了实验值。工程师在COMSOL模型中同时分析了理想各向同性特性和实际各向异性特性两种情况。

工程师使用IEC标准电流波形的解析表达式,将电流注入SPL的一端,电流会通过铜质引线从另一端流出。SPL与碳层之间的所有电连接均由铜材料制成。

在研究设计和模拟电磁脉冲传播的过程中,McKennon使用COMSOL软件求解了磁矢势的时域波动方程。他根

了整个结构中电流的总体特性。

各向同性假设低估了流经SPL的电流,据此得出的结论是:碳层中流过的电流更多,而SPL中的电流更少(图3)。碳层由许多独立的纤维层组成。纤维层内沿纤维方向具有极强的导电性,但要使电流在其中流入和流出,却是一项极具挑战的工作。如果碳层与其他物质的交界面通过大电流,则许多独立的碳纤维会因为过热和/或电弧而烧毁(图4)。由于碳层承受着主要的结构

据仿真结果确定了雷电附着点处的相关电流、电场和其他数据值,从而深入分析

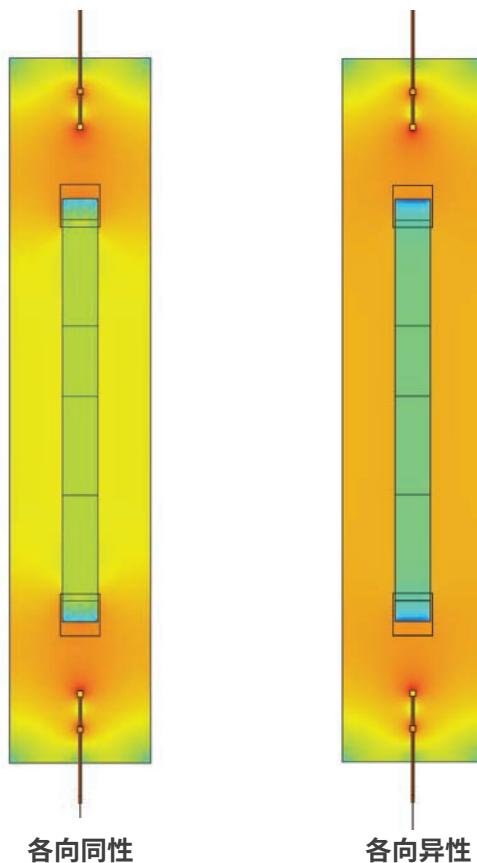


图3 仿真结果显示, SPL 在各向同性理想情况下的电流量明显小于各向异性实际情况的电流量。

载荷,这种损坏会大幅缩短叶片的使用寿命,严重时甚至会导致叶片出现灾难性故障。这就是工程师一直希望尽力避免碳层中存在过多电流的原因。

各向同性假设严重高估了碳层中的电流量,这是因为它忽略了碳纤维中的电阻实际上具有很强的方向性(图5)。如果忽略这种特性,仅考虑碳层在体积和长度上的优势,碳层似乎比 SPL 更适合作为电流通路,然而这与事实完全不符。这种错误的

高估很可能使工程师面临一些根本不存在的问题,延缓开发进程,造成产品过度设计。

McKennon 总结道:“在模拟复杂的物理场时,你必须明确哪些是关键因素,哪些是干扰项,然后循序渐进地建立模型,才能避免引入错误或采用不恰当的假设,确保仿真结果的准确性和可靠性。”

⇒ 根据精确结果做出明智的商业决策

“现在,我们已经具备了快速建立并优化仿真模型的能力,这不仅帮助我们大大降低了项目风险,更使得按需应变地获取工程级数据变成了现实。” McKennon 评论道,“我们无需花费大量的时间和资金来制作复杂的测试样品,而是使用 COMSOL 模拟各种物理现象,这明显缩小了项目中潜在问题涉及的范围。在很多情况下,我们无法使用实物样品测得关键数据,因而需要利用数值仿真分析来弥补这些不足。”

“时间就是金钱,在我们行业尤其如此。借助软件提供的强大功能,我们能够为客户提供优质高效的服务。事实上,客户对仿真的有效性充满信心,他们甚至会完全依赖我们的仿真结果来制定大批量生产的业务决策,很少再进行实验验证。面对如此的利害关系和客户的高度信任,我们不允许自己犯错,也无法承担任何错误造成的后果。COMSOL 作为一款建模仿真工具,为我们带来了无穷的价值。我们也相信,COMSOL 模型能够准确地反映真实世界。” ❖

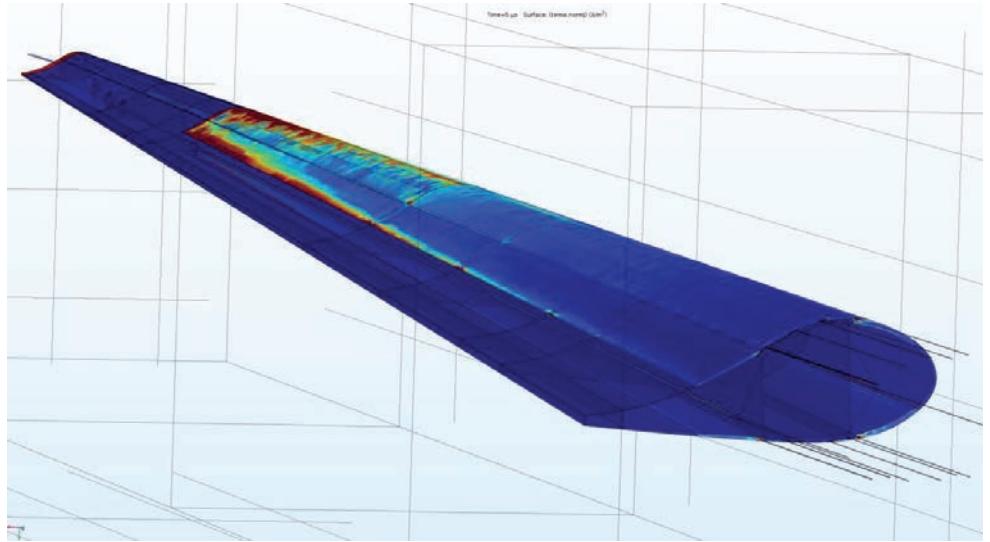


图4 仿真结果显示了由碳纤维复合材料制成的风力发电机叶片样品中的电流密度。

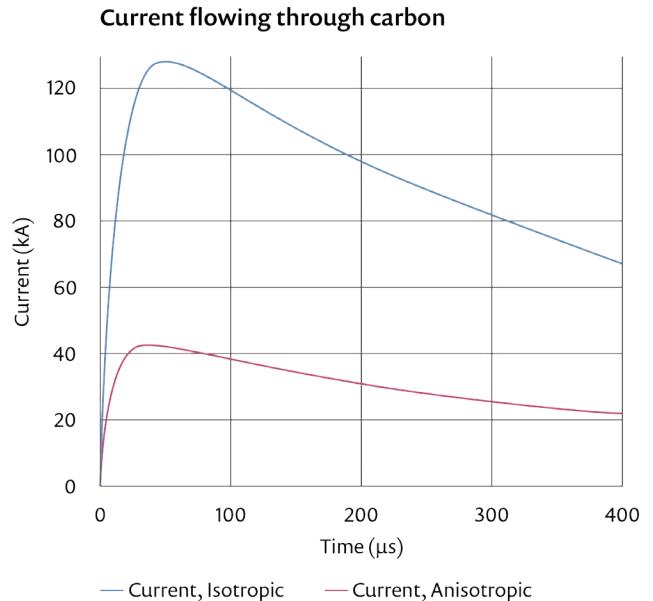


图5 绘图显示了各向同性和各向异性碳纤维中的电流水平。
图注:Current - 电流; Isotropic - 各向同性; Anisotropic - 各向异性。



Justin McKennon,
NTS 建模分析团队
负责人。

新型电缆设计

——仿真软件为电缆行业带来巨大变革

普睿司曼 (Prysmian) 集团利用多物理场仿真技术研发出高科技电缆, 从而开拓了新业务并增加了利润。

作者 **DEXTER JOHNSON**

普睿司曼集团是全球能源和通信电缆行业的领导者, 仅在能源这一领域的产品就有很多种类, 例如应用于陆地和海底的高压电缆, 其中既有适用于高压交流输电系统的电缆, 也有适用于高压直流输电系统的电缆。

早在 2010 年, 普睿司曼集团的研发团队就对设计和测试新电缆及系统的方式进行了重大变革, 并已带来红利, 包括新增收入和利润的提升。通过全面采用多物理场仿真技术, 研发团队能够不断地优化电缆和系统的设计, 以适应各种恶劣的环境。

⇒ 从近似值到热仿真

在设计电力传输系统时, 需要重点考虑的一个问题是: 系统既要在稳定状态下输送规定的电流, 又不能超出最大允许工作温度。为了解决这一问题, 必须建立一个精细的、包括各种变量的系统热模型, 这些变量包括: 电缆的结构和内部电损耗源 (图 1), 装置的几何结构, 安装环境 (例如土壤、水、加压气流或浮力气流), 环境温度, 太阳辐射引起的外部负载, 以及该系统与其他基础设施之间的距离。

在使用多物理场仿真之前, 普睿司曼集团和电缆行业其他公司都是采用国际标准提供的公式或计算方法, 这类标准能够非常好地处理那些电缆处于不受干扰的热状态 (通常是地下) 的情况。但现在, 电缆系统安装或横穿在那些不良热环境区域的设计方案变得越来越普遍, 例如, 在现有基础设施附近安装的新电缆系统, 有很大概率存在其他电缆穿越新电缆路线。

普睿司曼集团选择 COMSOL Multiphysics® 仿真软件来开发计算模型, 将每根电缆的结构、电力传输系统的结构、负载条件以及外部环境情况都考虑进来, 以获得真实可靠的仿真结果 (图 2)。

“COMSOL 能够解决这类问题, 因为我们可以建立一个

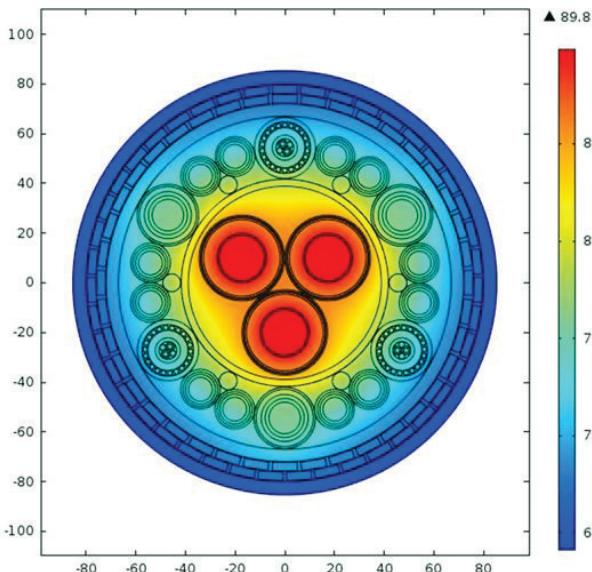


图 1 双层铠装脐带电缆横剖面的温度分布。

参数模型来优化电缆的几何结构、铺设方式, 甚至可以将空气对流所需的物理条件也考虑进来。”普睿司曼集团建模和仿真专家 Massimo Bechis 解释道, “我们可以做大量的瞬态分析, 从而了解每天的太阳辐射和环境温度变化对电缆的影响。之前我们只能将电缆的运行情况看作是恒定不变的, 现在我们可以了解到电缆当前的负载变化。不同的负载对电缆有不同的要求, 仿真能够让我们满足这些不同的要求。因此, 多物理仿真实确实解决了这类以前很难解决、甚至不可能解决的问题。”

⇒ 实现最优化的理想维护过程

当 Bechis 及其同事设计普睿司曼的一些高科技产

品时, 数值仿真技术已经改进了他们的工作方式。例如, 在设计复合电缆时, 在同一个结构中包含了电力导线、信号传输电缆和输送流体的软管等各种零件, 因此可以通过参数研究来优化复合电缆中这些零件的几何尺寸或位置。Bechis 期望通过逐步实施这些方法, 能够推动制造工艺的改进。

基于简化的模型, 普睿司曼公司内部利用 Microsoft®、Excel® 及 Visual Basic® 等商用软件, 开发了一些数学工具。在使用多物理仿真之前, 许多研究都是使用这些工具来实现的。在使用这些内部开发工具时, Bechis 总结了很多建模诀窍, 这使得他在转向使用新工具时, 能够用更精密的细节完成建模, 并且能够获得更高

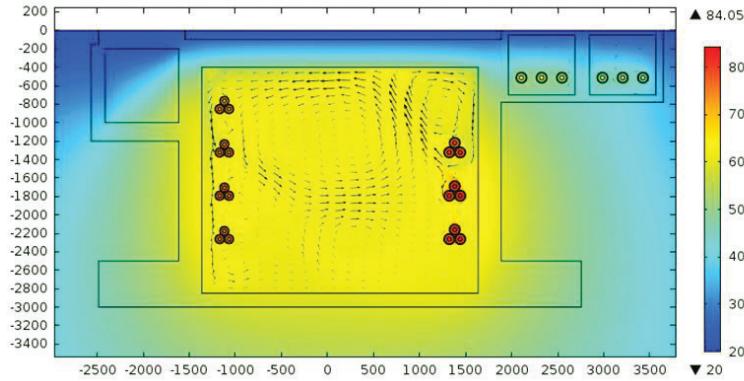


图 2 利用 COMSOL Multiphysics, 普睿司曼将热、计算流体动力学(CFD)相结合, 对置于仅有自然通风的水平隧道内的高压电缆系统进行了分析。

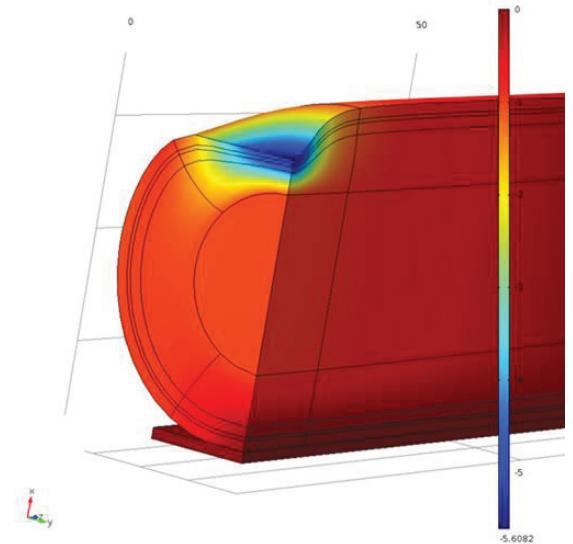
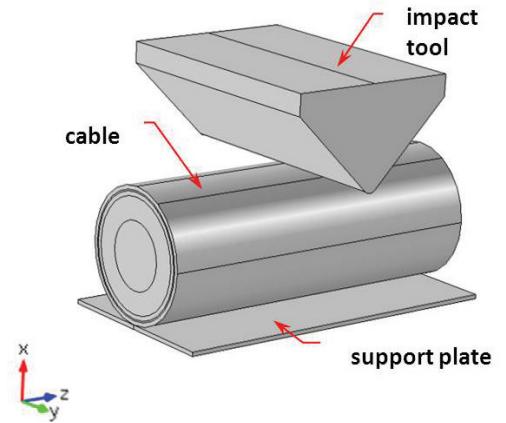


图 3 中压电缆冲击测试仿真。
图注: Impacttool-冲击工具; Supportplace-支撑板; Cable-电缆。

的准确性。他表示说, 借助 COMSOL Multiphysics 软件, 公司已经向前迈出了一大步, 而且给设计师和客户提供服务也得到了提升。

“如今, 我的同事们提出了很多的要求, 因为他们知道 COMSOL 软件可以帮助他们分析并解决许多与热、电磁和结构有关的问题。” Bechis 如是说。

在使用仿真工具之前, 普睿司曼从未发生过电缆故障。但是为了保持一直以来的完美记录, 对每根电缆和每个系统所采用的计算都留出了很大的设计余量。

“现在我们能够优化电缆结构, 并且能够保证电缆仍然满足规范的要求。” Bechis 说道, “我们还可以解释为什么要在某一层中使用一定数量的某种材料, 并展示我们是如何根据建模做出这一决定的。”

借助仿真工具, 还可以对

中压电缆的冲击测试展开分析(图 3)。利用计算机对这类测试进行仿真计算, 意味着研究人员可以利用它来优化电缆外层的厚度和材料类型。

“我们不需要在实验室里做大量测试,” Bechis 表示, “作为替代, 我们可以在电脑上做很多虚拟测试。当我们确信找到了电缆的最优设计时, 便可将其制造出来, 并在实验室进行常规的现场测试。”

尽管制造出的原型电缆仍然需要进行物理测试, 但是因为原型电缆更接近最终设计, 因此总体开发时间会大大缩短。这些测试能够验证电缆和系统的机械性能, 以便普睿司曼的研发团队确认他们可以依赖所建立的模型。

⇒ **增加利润和产生新收入**

普睿司曼使用新建模工具取得成功的最明显的标志

“多物理仿真可以真正地解决这些以前很难解决甚至不可能解决的问题。”

——MASSIMO BECHIS,
普睿司曼仿真和建模专家

之一是: Bechis 及其同事能够对客户提出的很多请求做出回应, 这些请求明确要求除了通常使用的标准之外, 还要进行仿真工作。

“我们现在能够提供更好的服务,” Bechis 说, “不仅节约成本, 还改进了电缆和电力传输系统的设计程序。我们可以用非常高效的方式来响应客户的请求。” ❖

发电机传动系统

——磁力传动技术延长海上风力发电场的使用寿命

丹麦 Sintex 公司使用多物理场仿真对非接触式磁力联轴器进行开发和分析。基于这种磁力联轴器的传动系统具有更高的可靠性和密封性, 装置内的介质可以实现完全隔离, 能够在海上风力发电机和化工泵的应用中扮演重要角色。

作者 **ZACK CONRAD**

无论是汽车发动机、风力涡轮机, 还是随处可见的腕表, 扭矩转换和旋转功率的传递都是众多技术的重要组成部分。

传统的传动系统通常利用一组机械齿轮或轴来进行扭矩和功率的传递。机械传动装置中的连续接触部位容易受到摩擦、磨损和过载的影响。随着传动技术的应用环境更加恶劣和极端, 机械传动装置的局限性可能造成严重危害。在交通不便、环境恶劣的地区, 更换故障的传动装置是一项极具挑战的任务。

⇒ 无摩擦动力传递

Sintex 公司的工程师开发了一套具有更高稳定性和可靠性的新型传动系统: 磁力联轴器。这种联轴器的特别之处在于动力的传递是依靠磁力而非机械力来实现, 因此避免了接触和磨损, 大幅延长了传动系统的使用寿命。扭矩联轴器的动力传递依靠同轴的永磁体阵列(图 1)。当电源开启后, 一个驱动器开始转动, 它与另一个驱动器间的耦合磁场会带动另一个驱动器以相同的速度转动。该系统中的旋转功率传递与机械传动装置相似, 但是由于没有摩擦, 所以不存在过载风险。如果电机传递的扭矩过

大, 则联轴器会限制对轴施加过量扭矩, 这一机制可防止轴所承受的扭矩值超过设计极限, 从而保证系统能够在预期工作条件下持续运行。

对于海上风力发电机和采用复杂泵系统的行业来说, Sintex 的非接触式磁力联轴器是一款理想的产品。海上风力发电场因发电量大的优势而备受关注。然而由于风机零部件维修难度极大, 因此这些零部件需要具备高度的可靠性。在单台涡轮机中, 磁力联轴器将能量从电机传递给水泵, 用于全天 24 小时冷却电子元件。由于海上风力发电系统的远程离岸安装, 预防性维护或维修任务非常繁重, 且成本高昂, 因此磁力联轴器的可靠性成为了重中之重。驱动器之间的间隙可以轻松容纳一个隔离密封套(图 2), 其作用是隔离不同的介质, 形成密封系统。这类系统主要用于化工和食品工业, 在化学品和有毒物质的运输、混合、搅拌和研磨过程中, 无泄漏泵系统的重要性不言而喻。

⇒ 磁力联轴器的广泛应用

Sintex 生产的磁力联轴器具有广泛的应用范围。不过在实际应用中需要根据给定的约束条件进行个性化定制, 例

如满足质量或材料要求, 符合几何结构限制等。在设计过程中, 工程师需要反复修改磁体的形状和材料, 才能设计出符合客户需求的产品。由于磁体样机的制作成本高、耗时长, 工程师希望在不用构建样机的情况下就能改进设计。为了节省时间, Sintex 使用多物理场仿真来表征各种构型, 并为设计创建虚拟原型。Flemming Buus Bendixen 是 Sintex 公司从事磁性材料研究的专业人员, 拥有二十多年的仿真分析经验, COMSOL Multiphysics® 是他近十年最常用的仿真工具。

“在我看来, COMSOL 最大的优势是支持各种类型的仿真。你可以在软件中添加多种物理场, 并模拟它们之间的相互作用。” Bendixen 评论道。他的团队建立了大量完善、复杂的模型, 这些模型经过了严格的验证和确认, 赢得了团队的充分信任。仿真模型不仅帮助工程师团队节省了时间, 使他们可以将更多的精力和资源集中在完善细节上, 同时为 Sintex 的客户节约了成本。

⇒ 革新设计, 消除风险

磁力联轴器的主要作用是沿轴传递最大的扭矩和功率。Bendixen 使用多

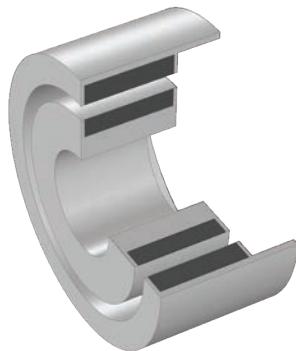


图 1 磁力联轴器结构示意图。

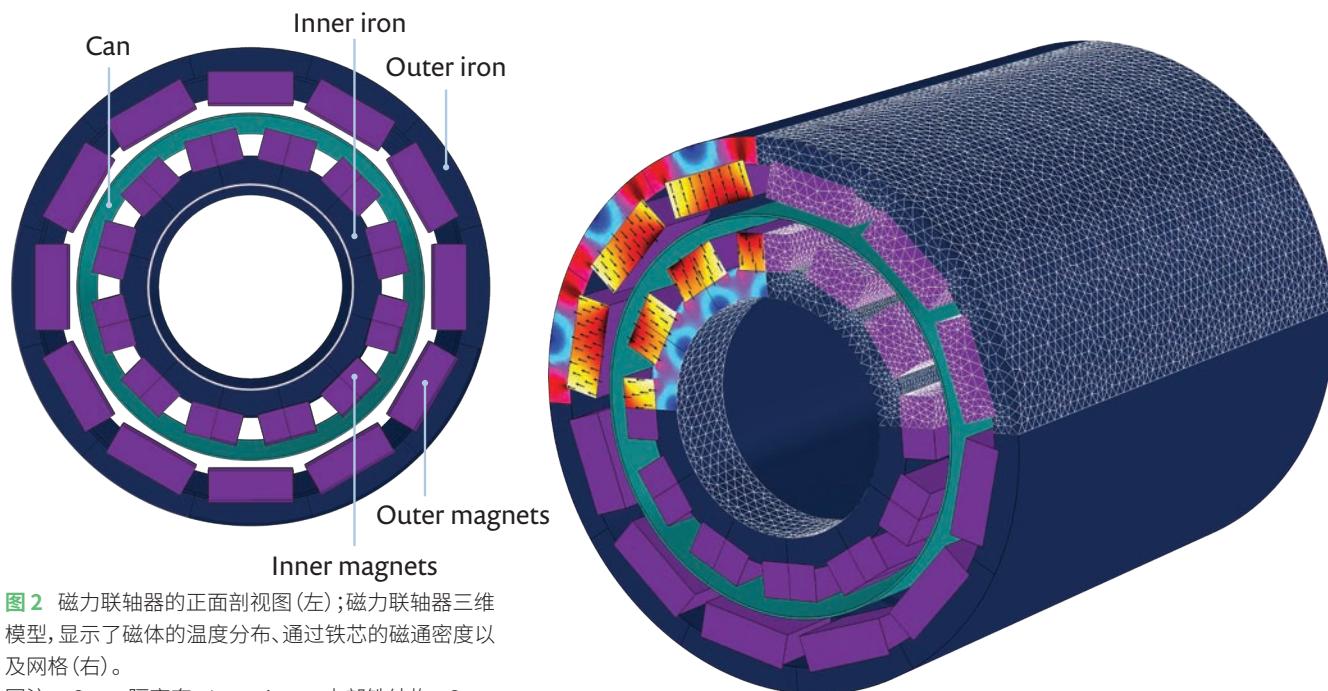


图2 磁力联轴器的正面剖视图(左);磁力联轴器三维模型,显示了磁体的温度分布、通过铁芯的磁通密度以及网格(右)。

图注: Can - 隔离套; Inner iron - 内部铁结构; Outer iron - 外部铁结构; Outer magnets - 外磁体; Inner magnets - 内磁体。

物理场仿真来研究磁力联轴器驱动器之间的相互作用,并计算出从外部驱动器传递给内部驱动器的扭矩。Bendixen通过多种方式来计算扭矩,包括麦克斯韦应力张量法、后处理积分法和 Arkko 方法。经过与实验结果对比,仿真分析的误差只有 1%,模型的准确性得到了充分验证。在新设计的开发过程中,该模型可用于研究特定结构中传递的最大扭矩。

考虑到永磁体磁场会带来许多负面效应, Bendixen 努力通过仿真来模拟它们产生的影响。在联轴器的钢制隔离套等金属材料中,外磁场会引起涡流,从

而产生电损耗。“南北磁极的变化会在钢结构内产生电压,系统会由于钢的导电性而产生能量耗散。” Bendixen 解释说。对于这种被称为隔离套涡流损耗的现象,研究团队希望利用软件中的后处理工具对其进行分析,力争将这类损耗降至最低。该团队使用内部开发的仪器对设计中的隔离套涡流损耗进行了实验测试。仿真结果和实验结果只有百分之几的差别,进一步证明了模型的准确性。

“我们致力于捕捉磁性材料的真实非线性特性。COMSOL 软件为我们提供了强力支持,确保阵列达到最佳磁化效果。” Bendixen 表示。团队在仿真

(上图)中采用了高度非线性的磁滞曲线,并依据曲线和材料温度的相关性来调整磁负载,由此来防止永磁体达到临界温度而产生不可逆的退磁。这对于确保产品的可靠性来说至关重要。“确定磁体能承受的最高温度是极其重要的,我们现在可以非常准确地计算出温度上限值。” Bendixen 补充道,“磁体一旦过热,就可能产生局部退磁。”

Bendixen 进一步发掘了多物理场仿真的灵活性,通过导入 Sintex 的磁性材料库,可以对各种磁体构造进行定制化设计。

⇒ 仿真人员的“得力助手”

Sintex 在创建含有足够细节的复杂模型后,便会着手扩大模型的使用范围,让非仿真专业人员也能使用这些模型进行仿真分析。以前,销售人员和其他没有仿真经验的同事需要对设计进行测试

“在我看来,COMSOL 最大的优势是支持各种类型的仿真;你可以在软件中添加多种物理场,并模拟它们之间的相互作用。”

—— FLEMMING BUUS BENDIXEN, SINTEX 公司磁性材料专业研究人员

时, 他们会请求 Bendixen 帮助完成所有的计算工作。

为了能够让同事们尽快得到仿真结果, Bendixen 基于多物理场模型开发了仿真 App, 仿真的效率和便捷性都因此达到了前所未有的高度。目前在 Sintex 公司, 多达二十位用户正在使用十款不同的仿真 App。这些仿真 App 都是直接在 COMSOL Multiphysics® 中利用“App 开发器”工具创建的, 用户只需要连接到 COMSOL Server™ 就能通过网页浏览器进行访问。仿真 App 直观的用户界面和简易的部署方式让所有员工都能轻松使用。公司甚至可以为重要客户开放这些仿真 App 及其计算功能的使用权限。“我之所以开发仿真 App, 是因为一些同事不熟悉仿真软件, 但又希望自己运行系统测试和仿真分析, 而仿真 App 让这一切成为了现实。” Bendixen 说道。

借助仿真 App, 用户无需修改底层计算模型就能调整设计参数。“销售人员可以通过电话与客户确认产品需求规格, 并在短短几分钟内, 快速修改模型尺寸并运行仿真, 及时为客户提供所需的数据。” Bendixen 说。仿真 App 虽然界面简单, 但具有极强的灵活性, 为设计创新提供了充足的发挥空间。用户可以在 Sintex 开发的仿真 App 中调整几何参数和磁性参数, 然后基于这些参数计算磁体的临界温度、剩磁分布、磁通密度、扭矩和隔离套涡流损耗等。图 4 显示的仿真 App 示例用于模拟隔离套中产生的涡流, 得到的电流值可以用于计算系统的功率损耗。现在, 各个开发阶段涉及的人员都能参与到设计过程中, 为最大限度地提高产品可靠性贡献自己的力量。



图 3 标准的磁力联轴器。

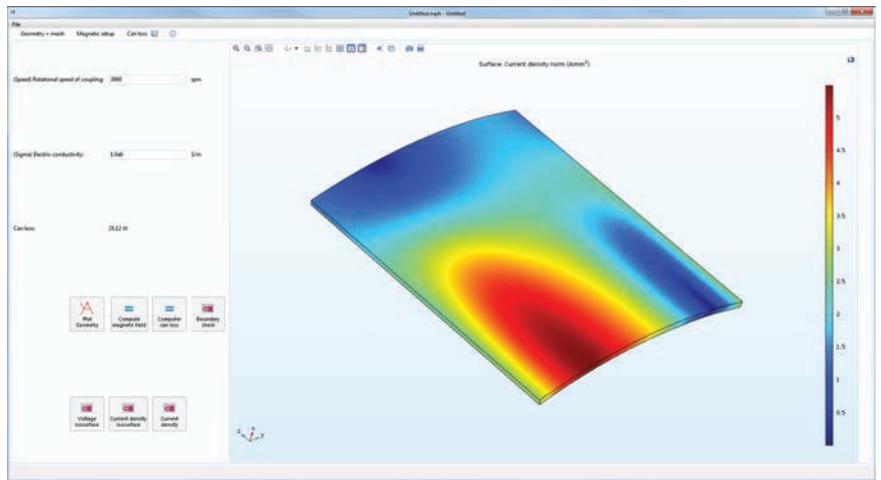
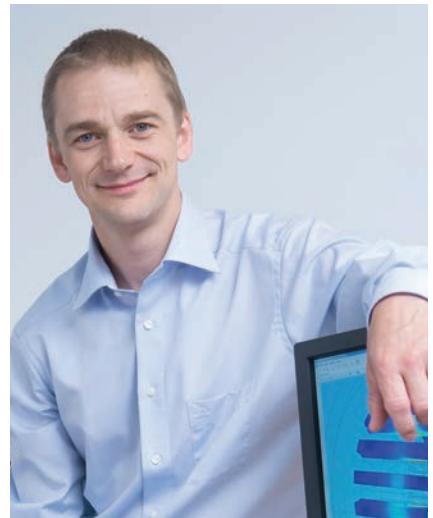


图 4 仿真 App 模拟了隔离套内的感应涡流密度, 并计算由此引起的能量损耗。

⇒ 展望未来

Sintex 目前正在开发一种新型的磁阻式传动装置, 用于进一步扩大传动装置的应用范围。这种装置不仅可以实现可靠的非接触式磁力传动扭矩, 还可以改变驱动器之间的速度或扭矩, 从而在传动比固定的情况下发挥机械优势。新型传动装置具有独特的设计, 其中加入了一块磁化方向与轴平行的永磁体, 极大地简化了装配结构。在仿真 App 的帮助下, 更多人员能够参与分析过程, 这就使 Bendixen 能投入更多的时间和精力专注于改进 Sintex 的磁技术。❖



Flemming Buus Bendixen, Sintex 公司磁性材料研究员。

非标电容器设计

——仿真 App 加速定制电容器的设计进程

美国 CDE 公司的工程师们利用仿真 App 对定制化电容器的设计进行了评估和优化。这些仿真 App 帮助设计和制造部门的工程师们摆脱了复杂计算模型的制约, 使他们能够在现场对器件的配置进行快速探索。

作者 **SARAH FIELDS**

电容器是一种广泛用于电子设备中的电子元件, 其应用范围还包括那些需要在极端条件下工作的设备。不同的应用领域对电容器的需求各不相同。电容器有时需要符合严格的功率规格, 或能在特定的温度范围内工作, 有时甚至必须由特定的材料制成。

CDE (Cornell Dubilier Electronics) 公司是全球规模最大的定制化电容器制造商之一, 其开发的电容器不仅应用于风力涡轮机和太阳能等民用设备中, 在战斗机和雷达系统等对装置精度要求极为严苛的军事和航天领域的设备中也有着广泛的应用。在定制化电容器的开发工作中, CDE 公司的工程师使用了数学建模和定制化的仿真 App 对电容器的设计进行微调。

CDE 公司的研发主管 Sam Parler



图 1 铝电解电容器。电解质绕组由铝箔和纤维素隔膜构成, 并呈现热各向异性。

表示: “通过使用 COMSOL Multiphysics® 及其 ‘App 开发者’ 工具, 我们可以建立高精度的多物理场模型, 并基于模型开发仿真 App。这一方式让其他部门的同事能够对不同配置进行自由地测试, 从而选定最优设计。”

⇒ 何时开始升温

CDE 公司针对不同的应用领域分别设计了包含一个或多个元件的电容器, 如由铝箔和纤维素隔膜组成的电解质绕组、由偏置的金属化介电膜构成的静电绕组、交错叠加的金属箔片, 以及云母等电介质 (图 1)。

发热现象是电容器设计人员面临的一个重要问题。过多的热量会大幅缩短电容器的使用寿命。如果电容器的工作温度比最大设计温度值高 6~10 °C, 其使用寿命将会减少至原有寿命的一半。当电流通过铝箔绕组时会产生焦耳热, 如果忽略这一因素, 将无法全面地了解电容器内的热量分布。因此, CDE 公司的工程师希望通过仿真将发热量降至最低水平, 并优化装置的散热性能。

为了达到上述目的, 设计人员必须对电容器中复杂的材料组成进行精确表征。电容器通常包含多达六种不同的材料, 其中部分材料具有各向异性的特征。在某种电容器的设计中, 绕组由纤维素

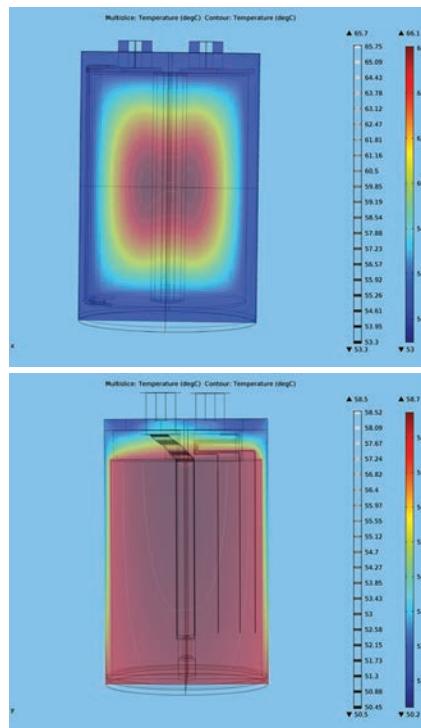


图 2 金属化聚丙烯薄膜电容器 (上) 和铝电解电容器 (下) 的热分布对比, 二者的几何尺寸均近似为 76 mm × 120 mm, 并且在 45 °C 环境中具有 5 W 的耗散功率。

隔膜和铝箔构成, 并表现出各向异性导热性能, 其轴向的导热系数比径向高出两个数量级。

得益于 COMSOL® 的灵活性, Parler 可以直接输入张量形式的导热系数, 从而获取电容器中准确的热分布。以典型的简单电容为例, 可近似地认为沿 z 轴方向的圆柱形电解质绕组的电容张量是正交各向异性的, 并将其导热系

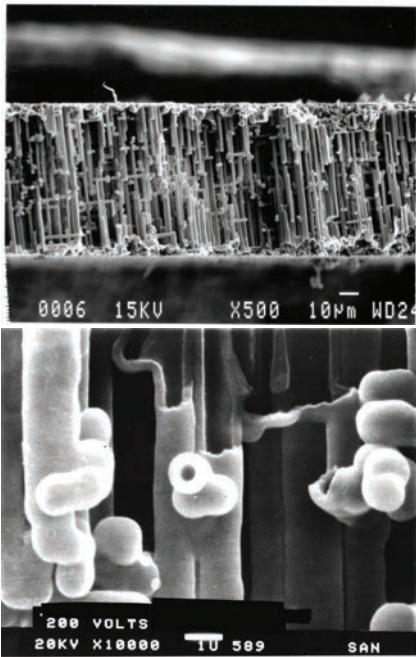


图3 大型铝电解电容器的同轴微结构示意图。其中电介质为氧化铝，它由高度蚀刻的曲折铝箔表面经阳极化处理制成。图中氧化铝介电管周围的铝已被溶解。

数设置为 {1,1,100} [W/m/K] 的对角张量形式。

在一次测试中，Parler 采用了两种电力电容器，分别为金属化聚丙烯（塑料）薄膜电容器和铝电解电容器（图1-图2）。这两种电容器的尺寸和额定纹波电流相似，但结构完全不同。

塑料薄膜电容器（图2上）的轴向导热系数比铝电解电容器（图2下）低得多。借助多物理场仿真，Parler 可以准确地计算出在给定耗散功率下，塑料薄膜电容器将会比铝电解电容器的温度高多少。

⇒ 使用形状优化技术揭示微结构

CDE 公司开发的电容器通常是技术创新的产物，因此在某些情况下，公司需要自行测量一些前沿材料的阻抗。Parler 曾在设计一款大型铝电解电容

器时，需要对具有复杂微结构的氧化铝（ Al_2O_3 ）电介质的阻抗进行表征。这类电介质是由高度蚀刻的曲折铝箔表面经过阳极化处理制成的（图3）。

虽然使用另一款软件来执行零维电路仿真也能再现频率响应，但是由于其内置的拉普拉斯逆变换算法带有局限性，并会引起“非因果性”错误，因此无法执行瞬态仿真。

利用 COMSOL 软件提供的形状优化技术，Parler 可以为客户计算出正确的瞬态解。为了通过非线性优化方法找到最佳的几何形状，他从一个孔隙填充有电解质的圆柱形电容孔隙开始模拟，在开口处施加给定的激励，并启用了软件中的稀疏非线性优化求解器（sparse non-

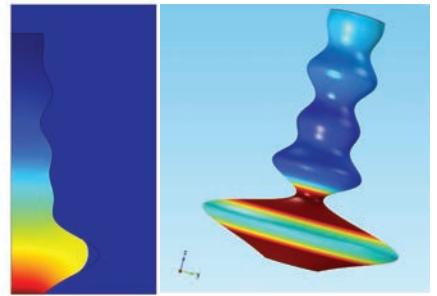


图4 针对由介电材料构成的同轴微结构而言，形状优化技术是获取其电气特性的有效方法之一。上图显示了优化后的微结构。

linear optimizer solver, SNOPT)。在求解过程中，他需要不断调整轴对称孔壁的形状，直到模型的计算结果与通过实验得到的阻抗数据能够吻合。

图4为最终生成的几何图形。表明

“通过使用 COMSOL Multiphysics 及其‘App 开发器’工具，我们可以建立高精度的多物理场模型，并基于模型开发仿真 App。这一方式让其他部门的同事能够对不同配置进行自由地测试，从而选定最优设计。”

—— SAM PARLER, CDE 公司研发主管

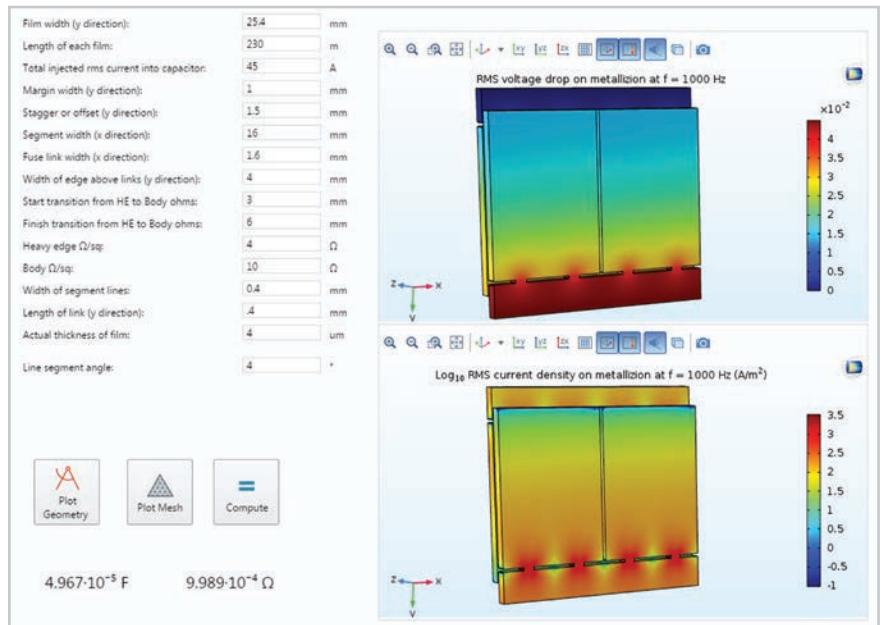


图5 用于计算功率薄膜电容器的电容和电阻设计的仿真 App。

COMSOL 软件能够准确地重现由实验测量得到的瞬态脉冲电流响应。之后研究人员便能够基于经过验证的数学模型,开展下一步的设计工作。

⇒ 用于电气优化的案例库

在使用 COMSOL 软件创建了用于分析设计方案的模型后, Parler 和团队成员将模型封装成仿真 App。封装后的仿真 App 能够被自由地部署和分发给设计人员和生产部门,协助他们完成设计工作。

当进行功率薄膜电容器设计时,设计人员可以在仿真 App 的用户界面中输入相关参数,包括薄膜宽度(通常为几厘米)、薄膜长度、表面电阻和过渡区位置等,进而计算出一段金属薄膜的电容和电阻(图 5)。将仿真结果按比例放大,能得到整段绕组的电容和电阻数据,从而帮助工程师完成对设计的初步验证。

另一个仿真 App 适用于计算圆柱形电容器中金属薄膜的功率密度,并可对包括接头和端子在内的芯子温度分布进行预测。该仿真 App 还分析了纹波电流、环境温度和气流速度等客户需要的工作条件(图 6)。

第三个仿真 App 的作用是计算单接头薄膜电容器的等效串联电感(effective series inductance, ESL)(图 7)。使用者可以自由地修改端子的直径、高度、间距、接头宽度、绕组直径和芯子外径等几何参数。底层模型利用了 COMSOL 软件中的频域研究和电磁建模功能。ESL 是各类电容器设计的关键参数,它会直接影响电容器的性能。

⇒ 仿真 App 引领制造业的未来

在多物理场仿真的帮助下, Parler

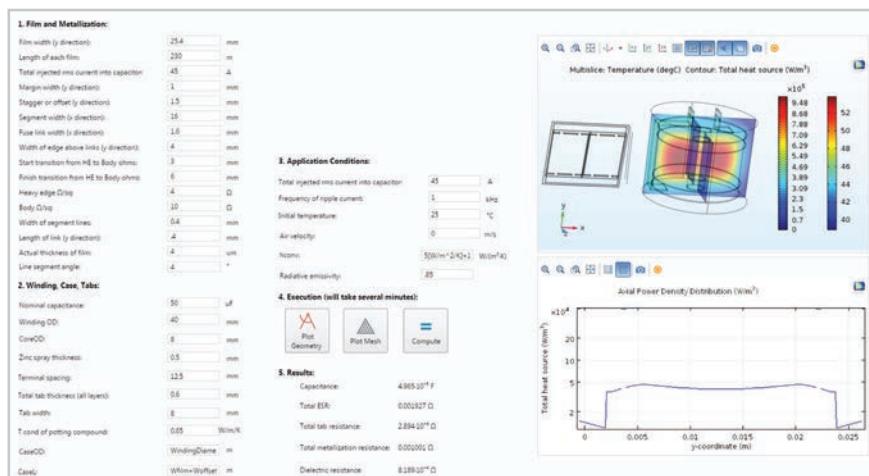


图 6 一款用于预测带接头和端子的圆柱形电容器内芯子的温度分布和薄膜的功率密度的仿真 App。

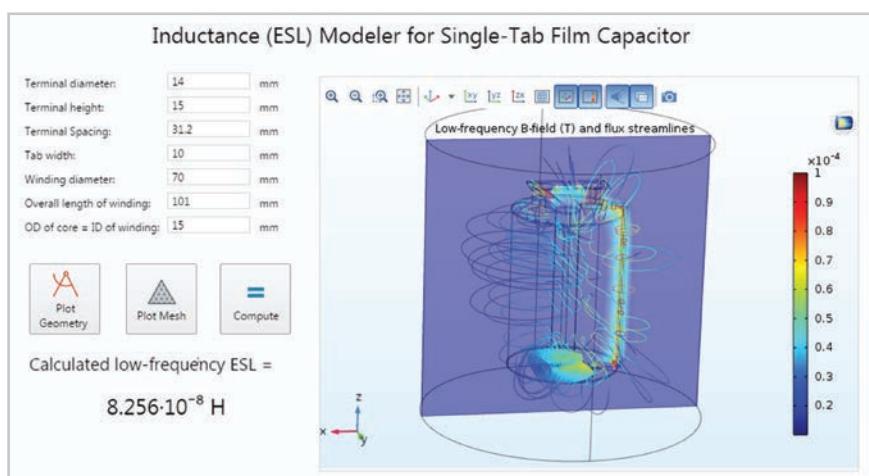


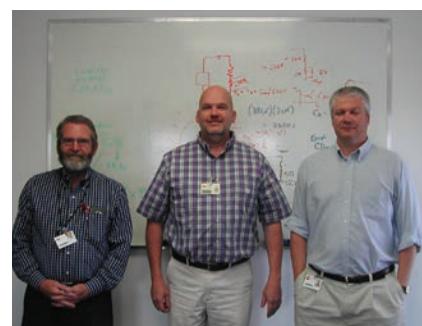
图 7 一款用于计算单接头薄膜电容器的等效串联电感的仿真 App。

的团队能够准确预测电容器设计的性能,这不仅帮助他们大幅提升了研发效率,同时还确保了产品的可靠性。

借助基于 COMSOL 模型开发出的仿真 App,生产现场的设计人员和工程师可以在简洁的用户界面中调整关键参数,测试电容器的性能和不同参数对电容器的影响。这种方式将仿真的强大力量延伸到了整个设计和生产过程。

Parler 总结道:“多物理场模型和仿真 App 的存在大幅简化了电容器的设计流程,帮助我们为全世界的客

户更快地开发出性能更优的定制化电容器。”



CDE 公司的员工,从左至右依次为:研究员 David Leigh、研发主管 Sam Parler 和电容器工程师 Trent Bates。

输电线路的绝缘子设计

——仿真技术使输电线路性能最优化

高压输电线路的设计需要综合考量经济、电气、力学及环境等一系列限制因素,因此是一项十分复杂且耗时的工作。POWER Engineers 公司在进行新线路设备制造和高压测试之前,利用仿真技术对输电线路电晕性能进行分析,从而节省了时间和资金。

作者 **ALEXANDRA FOLEY**

利用高精度仿真技术,以及过去数十年运行设备分析所得到的经验,如今工程师已经能够研究、建模和消除电晕放电的细微影响。但在几年前,想要得到这些结果,只能通过费用高昂、过程严格的测试来实现。如今仿真技术正在成功地应用于多个领域,其中就包括分析电晕放电对大功率容量输电线路及其相关设备的不利影响。

研究人员通常会利用高压实验室测试或评估运行设备的表现进行这类分析工作,但全球咨询工程公司 POWER Engineers 公司(简称 POWER 公司)发现,有限元仿真软件是分析输电线路电晕性能的有效工具。例如,根据与中西部一家公用事业公司签订的合同,POWER 公司对 345 千伏输电线路设备的电晕性能进行了详细研究,旨在减轻风和冰载荷对线路造成的机械应力。通过这些仿真研究,工作人员可以在进实验室完成高压测试之前,就对设备的电气性能有一个更好的认识。

→ 复杂几何结构的电场计算

由于张力作用,高压输电线会在水平方向产生巨大拉力,因此需要设计一

种结构来承载这一巨大拉力,这就是终端结构。在这些终端结构上装有绝缘子,使得终端结构和带电导线虽然连接在一起,但却处于电隔离状态(图 1)。这些高压导线和终端组件表面附近的电场可以电离周围的空气分子,进而产生电晕放电,从而产生能量损失、电磁(AM 无线电)干扰、可闻噪声、可见光以及可能的材料侵蚀等一系列不良影响。

“如果你曾站在输电线路旁,很可能听到过它发出的嘶嘶声,”POWER 公司的高级项目工程师 Jon Leman 说道,“当电压达到一定数值后,电场会电离空气分子并产生电晕放电。通常这就是我们听到噪声的原因。要将这种噪声和其他负面影响降到最低,就需减少电晕放电。”对输电线路导线来说,一定程度的电晕活动及其相关影响是可以承受的,但对与导线相接触的器件来说,则不

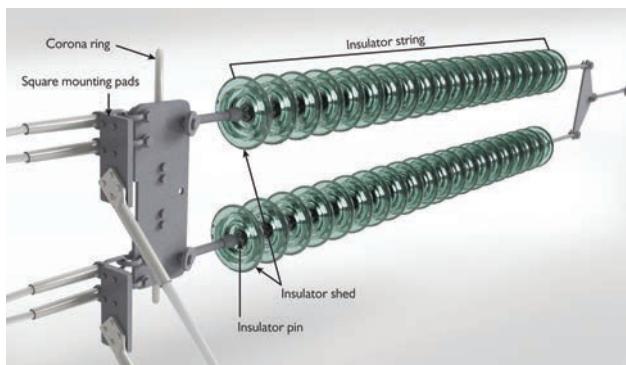


图 1 终端结构(上);终端绝缘子的 CAD 绘图(下)。

图注:Corona ring - 电晕环; Square mounting pods - 垫片安装; Insulator string - 绝缘子串; Insulator shed - 绝缘器; Insulator pin - 绝缘子脚。

应出现明显的电晕活动。Leman 采用了 COMSOL Multiphysics® 来确定通电器件表面附近的电场强度,并估算出高电场位置发生电晕放电的概率。

“为了降低仿真计算的工作量,我们选取了三相输电线路其中一相的绝缘子,并且只对绝缘子串的第一个单元进行了建模。”Leman 表示。之后,POWER 公司的研究人员将完整的绝缘子串作为二维轴对称模型,从而确定了最后一个绝缘子串单元盖上的悬浮电位(图 2)。得到边界电压后,就可以建立一个相当精确的三维模型。这种建模方法无需考虑绝缘子串复杂的重复几何结

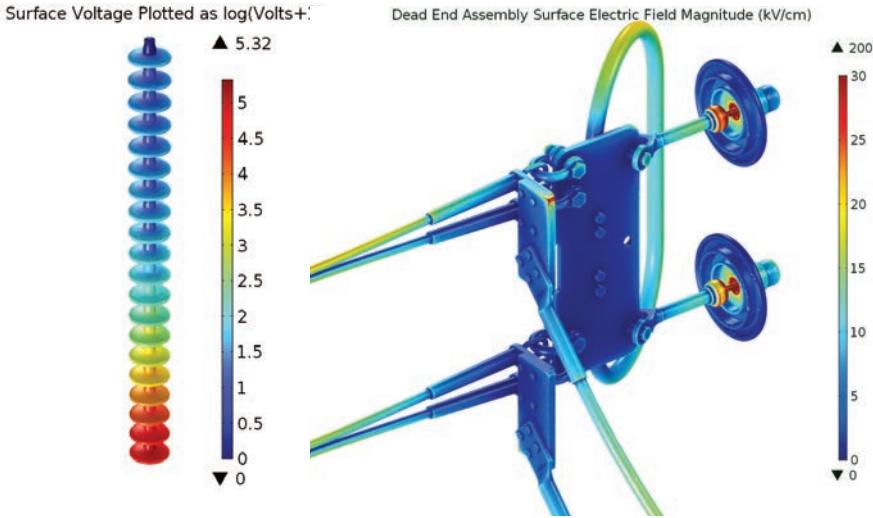


图2 绝缘子串电势分布的二维轴对称模型。

图3 终端绝缘子的表面电场强度。高电场区域出现在绝缘子单腿的引脚和方形安装垫片上。

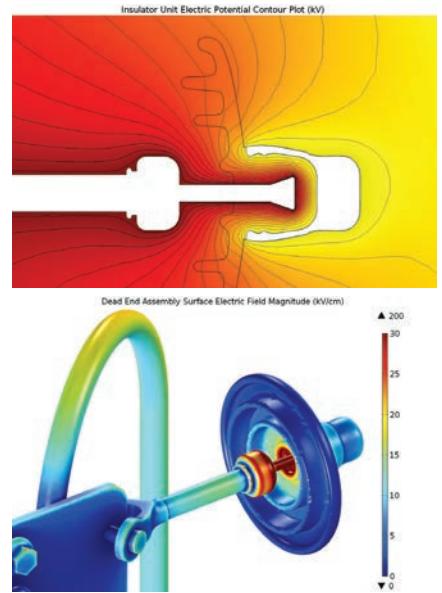


图4 绝缘子脚周围空气的电势截面(上);绝缘子脚的电场分布(下)。

构,同时减少了计算总量。

⇒ 预测输电设备的电晕性能

电晕放电是一种复杂的物理现象,受电场强度、器件几何形状、大气条件及导体表面条件的综合影响。Leman 将根据经验得出的、与空间相关的方程输入 COMSOL 软件中,对电场结果进行自定义后期处理,以估算高电场区域附近的空气电离的净数量。这种处理方法可以估算出电晕活动的概率。

结果表明,有两处区域的电场强度足以导致电晕放电:一处是绝缘子单元的通电引脚,另一处是较上方的方形安装垫片的一角附近(图3中红色区域)。

“我们的结果表明,方形安装垫片的外角易受电晕放电的影响,但只是轻微

的影响,” Leman 解释说,“然而,绝缘子脚可能会出现明显的电晕放电。”绝缘子脚处电场强度的详细分布见图4。

除电晕噪声和无线电干扰外,剧烈的电晕放电还会使绝缘子单元随着时间出现劣化,进而可能导致其强度和绝缘能力变差。Leman 表示:“现在我们已经确定了硬件上可能出现问题的位置,因而可以在测试前对设计进行修改。” RobSchaerer 是 POWER 公司的一名项目工程师,他也参与了这个项目,负责协调程序并为客户全程监督高压电晕测试的结果。他表示说:“实验室测试属于新硬件设计的重要组成部分,但可以通过预先的分析工作来节省测试费用,尤其是对需要复测的项目。预约一次高压实验室测试需要等待很长

的时间,因此在测试前进行合理的设计审查,就不太可能出现在第一轮测试中就发现设计存在不足的情况,从而降低对项目的不良影响。

⇒ 精确仿真驱动真实结果

仿真工作可以在设备组装之前就得出其运行情况。结合实证检验的结果,工程师可对新设计设备的性能做出合理预测。“我非常敬佩那些不利用现代计算就建造出电网的工程师。但重要的是,我们可将前辈们的精巧构思与先进工具的使用结合起来,从而高效开展未来电网的设计工作。” Leman 说道,“COMSOL 软件结合了我们所必需的工具,为客户提供了拟建传输线路性能的精确分析,从而能够减少在高压测试之后可能发生的设计迭代现象。”诸如此类的例子表明,仿真可以降低设备设计的成本并更快速地优化解决方案,从而改变设备设计的过程。❖

“COMSOL 软件结合了我们所必需的工具,为客户提供了拟建传输线路性能的精确分析,从而能够减少在高压测试之后可能发生的设计迭代现象。”

—— JON LEMAN, POWER ENGINEERS 公司高级项目工程师

高压开关 GIS 设计

——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 YUZHANG QIN

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件暴露在自然环境中, 从而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。

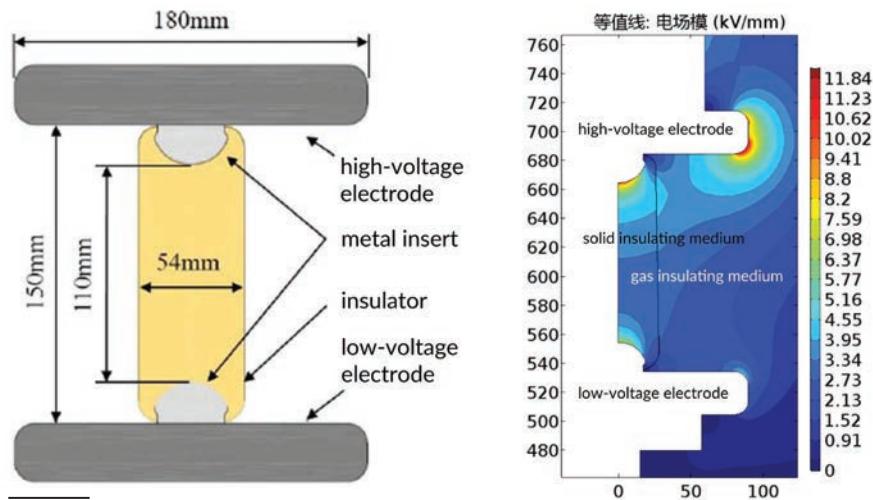


图 1 GIS 绝缘系统组件截面几何结构示意图 (左); 施加 100 千伏高压后绝缘子及其周围的直流电场分布图 (右)。

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

——张博,平高集团高级工程师

⇒ 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(SF_6)进行绝缘。由于 SF_6 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。

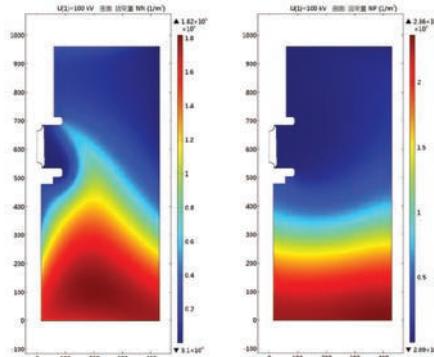


图 2 GIS 绝缘系统组件截面上的负离子(左)和正离子(右)的分布情况。

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 SF_6 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 10^7 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积累来改善 GIS 的绝缘设

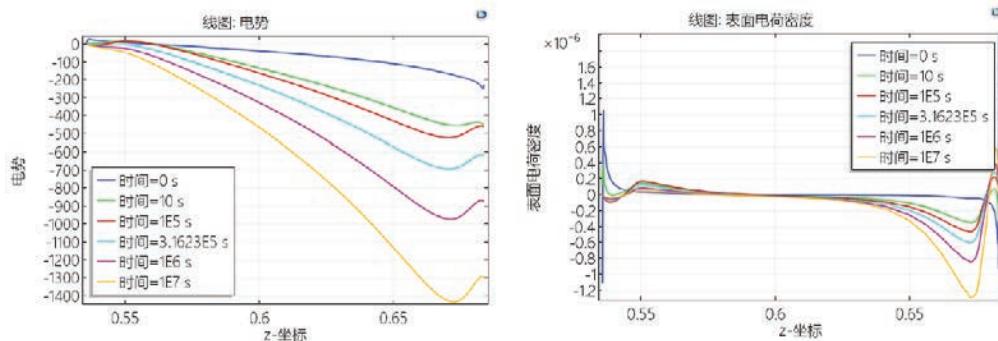


图 3 绝缘子表面电位(左)和电荷密度(右)随时间的变化。

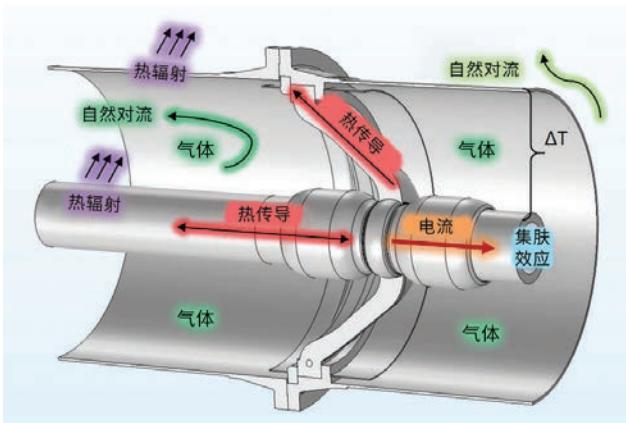


图4 GIS中母线传热仿真模型结构示意图。

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。

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。❖

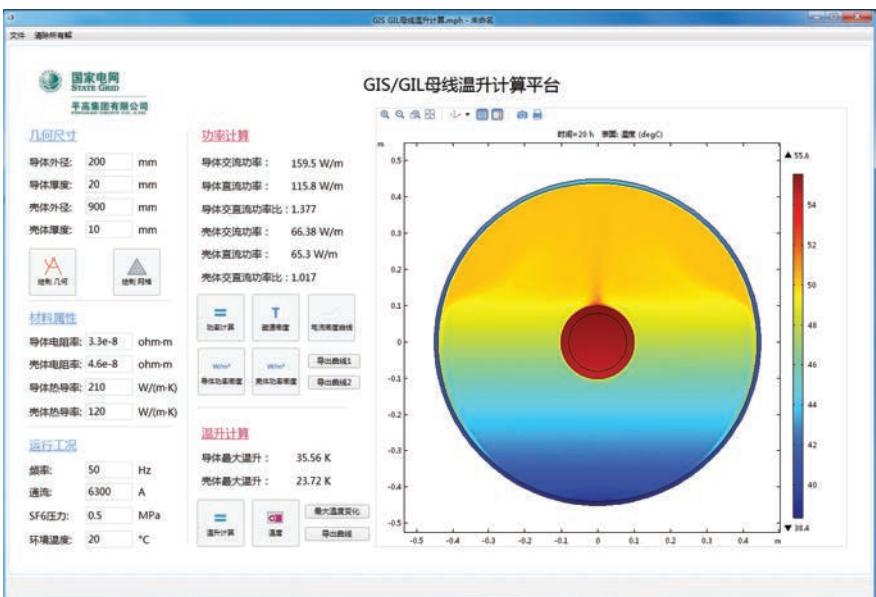


图5 GIS 温升仿真 App。



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、郭煜敬、张博、郝相羽、姚永其。

变压器与电抗器设计

——仿真推进电力变压器与并联电抗器更新换代

变压器是电网中最重要的部件, 为满足当今社会对电力的需求, 变压器设计师将目光转向了计算机建模。

作者 **DEXTER JOHNSON**

在位于圣保罗州容迪亚伊市的西门子巴西分公司, 设计师们正在运用仿真确保电力变压器和并联电抗器的运行安全。在这之前, 公司设计团队成员一直在使用内部研发工具, 仿真工作的加入, 让他们在面对不断增加的电力需求时, 能够更加游刃有余地控制设备过热问题。

并联电抗器用于吸收无功功率和提高传输系统的能效(图 1)。电力变压器则通过将电力从一个电压转换到另一个电压, 有效地输送电力。这两种设备都可用于电网中从发电到配电给最终用户的各个阶段。不断发展的城市对电力的需求越来越大, 因此就需要建造更大型的设备来满足这些需求。但有时会有很多限制性的因素导致设备不能建造的太大, 比如运输时存在困难, 以及客户工厂中放置设备的空间有限等。

在不增加设备尺寸的情况下, 更多的用电需求不仅会给设备增加额外负荷, 也会增加热量损耗, 导致设备温度上升。虽然这些设备的主要部件(芯部和绕组)的设计方式已经很完善, 但次要部件(结构件)的设计结构并不十分明确, 需要进一步地研究。如果设计不精细, 设备就会有过热的危险, 并最终可能导致变压器绝缘油性能退化。

⇒ 克服感应加热问题

为了解决这些设计限制, 西门子采用了 COMSOL Multiphysics® 仿真软件来控制金属零件的感应加热。感应加热是指处在变化的电磁场中的导体发热的一种现象。由于变化的磁场会在导体内部产生涡电流, 又由于电阻的存在, 涡电流会导致材料产生焦耳热。

感应加热时导体中一些小区域的感应电流密度会非常高, 通常称这些区域为“热点”。通过对感应加热过程的建模, 西



图 1 并联电抗器。电抗器外焊接着矩形盒子, 盒内有管道与电抗器箱体相连接, 在最初的油路设计中, 散热器通过这些管道与电抗器箱体相连接。图注: Connecting Pipes - 连接管。

门子的设计师消除了设备中的热点, 有效避免了设备出现高温的情况。受变压器几何结构和材料的复杂性所限, 完全避免这些热点是非常困难的。油浸式变压器中的绝缘油是一种非常有效的电绝缘体, 同时还起着冷却液的作用。然而, 热点会导致绝缘油过热, 产生气泡。与绝缘油相比, 这些气泡的介电强度更小, 可能会引起放电现象, 因此存在损坏变压器的风险。

“我们可以利用 COMSOL 软件对这种行为进行仿真,

并对变压器设计提出修改建议, 以减少结构件的感应加热。” 西门子高级产品开发人员 Luiz Jovelli 表示。

在感应加热的仿真工作中, 西门子采用了 COMSOL Multiphysics® 和 AC/DC 模块。仿真工作让设计团队作出的第一个改变是, 更改了金属结构的设计。例如, 改变并联电抗器原有的夹架结构(图 2 上), 使得该区域的油循环效果得到改善, 减少了感应加热, 并提高了冷却效果。这一结构变化带来的结

果是,热点的最高温度降低了约 40°C。这样就不再需要在夹架上安装铜屏蔽,从而节省了材料成本(图 2 下,图 3)。

由于 Jovelli 及其同事与 COMSOL 一起进行了仿真工作,因此他们能够对这些设备的设计提出多个改进建议。

“有时候设备的制冷装置可能会非常大,因此整个设计中会无法避免地出现一些热点,” Jovelli 说道,“借助 COMSOL,我们能够控制这些热点。” Jovelli 还发现,这么微小的一个改变,居然能够解决感应加热问题,同时还能降低与制冷装置相关的成本。

“COMSOL 是一个强大的建模和仿真软件,” Jovelli 说,“我们可以通过对其进行数值实验来提高计算的准确性。它同时也帮助我们战胜失败,使我们可以快速完成设计检测,从而保证设备在服役期的性能。”

⇒ 更高效地冷却芯核

从热的角度来看,并联电抗器的芯核相对于其绕组的热损耗要高于电力变压器,也就是说,电抗器的芯核损耗与绕组损耗之比高于变压器,因此可能会产生过热。所以设计方案必须保证芯核的有效冷却(图 4)。

在此种情况下,西门子仿真了并联电抗器内的油循环

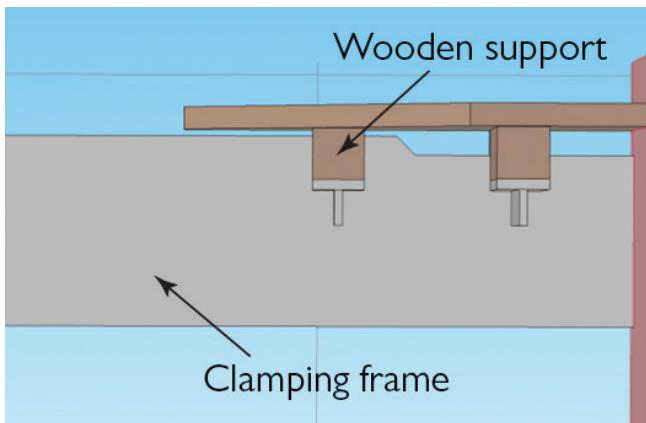
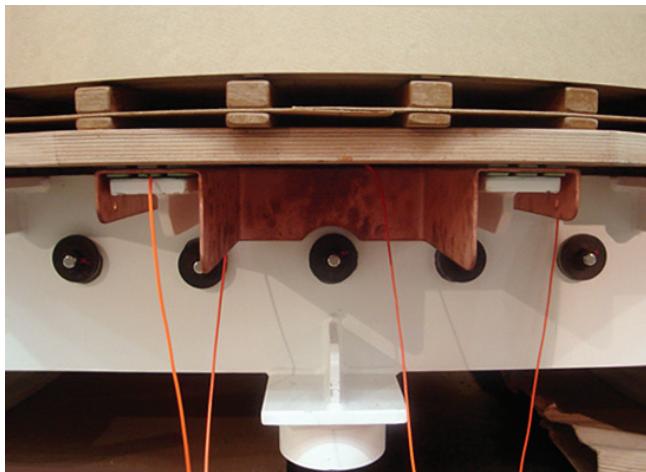


图 2 最初带铜屏蔽的夹架设计(上);使用更少材料优化后的夹架设计(下)。图注:Wooden support - 木支架; Clamping frame - 夹架。

“通过使用 COMSOL 并运用其多物理场耦合的能力,西门子建立了世界上首个真正的 3D 变压器模型。”

—— LUIZ JOVELLI, 西门子高级产品开发人员;
GLAUCO CANGANE, 西门子研发经理

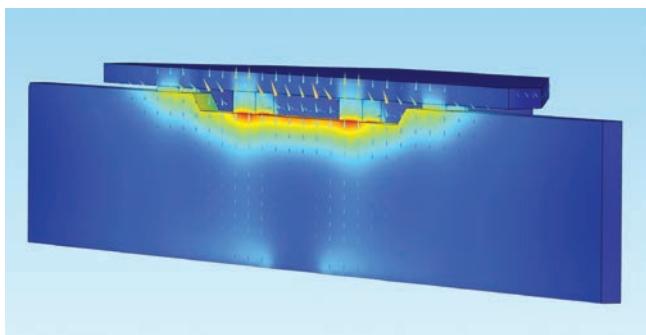


图 3 夹架的优化设计(后视图)图中显示了温度(面图)和油流场(箭头)。

和热传递,以了解绝缘油的性能,并提出了一个优化设计方案。在新的设计中,他们做了一个微小的调整,使得芯核的冷却效果不仅得到了提高,结构也比之前更加简洁,因此不仅能够减少维护工时,还可以节省材料。

另一处变化是针对焊接在电抗器箱体上的管道(图 1)。新方案中将设计更改为图 5 所示的水管,这不仅减少了材料的用量并降低了制造成本,同时还改善了电抗器箱底的油分布。

⇒ 将一维、二维和三维模型耦合到一个全油路仿真中

Jovelli 及其同事也对电力变压器内部绝缘油自由对流的三维热工水力行为进行了建模(图 4)。在对变压器进行计算流体力学(CFD)仿真分析时,需要将变压器的所有部件表示为三维模型,因此通常对软件计算能力有很高的要求。

COMSOL 软件允许研发人员将变压器中的管道或通道简化为一维模型进行高效仿真。这样做的一个特别优势就在于,可以将管道和通道的一维模型与大型实体的二维和三维模型进行无缝耦合。

“如果要对整个变压器油电路大量细节部位进行逼真的三维流体动力学仿真,

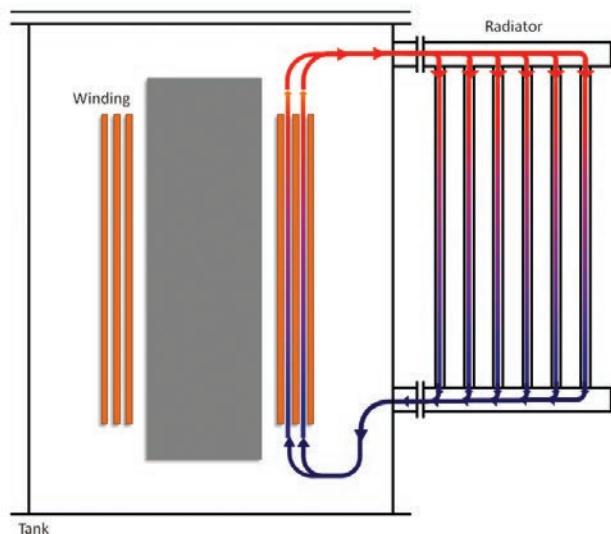


图4 并联电抗器和电力变压器的新型油路设计原理图。
图注:Radiator - 散热器; Winding - 线圈; Core - 芯核; Tank - 水槽。

就需要大量的计算机资源。” Jovelli 解释道，“因此有时候根据研究目标的不同，必须对某些细节进行简化，这导致得到的结果不太可靠。但借助 COMSOL 软件，我们可以轻而易举地将任何物理量的一维、二维、二维轴对称和三维模型耦合在一起，在同一个平台上开展仿真工作，从而保证得到的结果非常可靠。”

利用 COMSOL 软件将数据从边界（一维）耦合进表面（二维和二维轴对称）和体积（三维）的独特能力，Jovelli 能够使用二维轴对称模型对变压器绕组进行建模。此外，变压器箱体和进出口管道都采用了三维建模，换热器采用了一维建模。硅钢芯也是一种热源，对其采用了三维建模。由于变压器硅钢芯是

由硅钢薄片组成的，因此其各向异性的热性能也被考虑在内。

⇨ 多物理仿真推动现实发展

对 Jovelli 及其同事来说，由于 COMSOL 具备多物理场特性，因而可以对设备进行更真实的仿真。

“将物理场结合起来的的能力，使我们能够以一种高效计算方式，对现实世界的物理场进行精确建模。” Jovelli 和西门子研发经理 Glauco Cangane 表示说，“通过使用 COMSOL 并运用其多物理场耦合的能力，西门子建立了世界上首个真正的 3D 变压器模型。甚至我们也许是有史以来首家成就此番事业的变压器制造商。” ❖

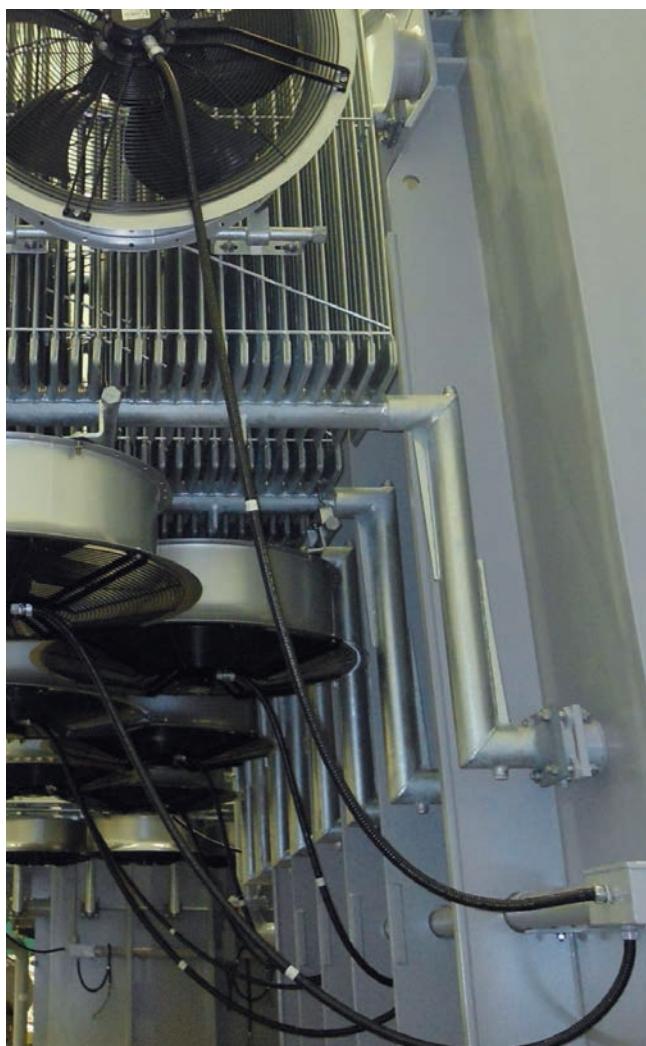
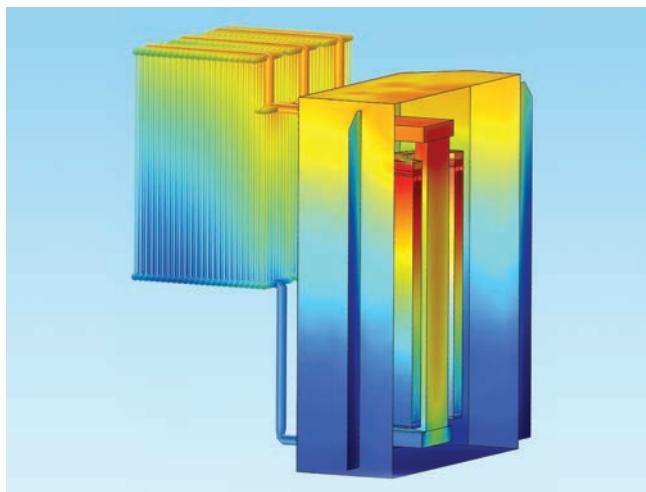


图5 新型集水管的热流体动力学仿真(上);新型集水管设计(下)。在新的设计中,管道由原来环绕在电抗器外部,变为直接从冷却风扇进入电抗器中。

核聚变发电机设计

高性能核聚变发电机的结构完整性评估

偏滤器是一种小型核聚变设备, 能将全尺寸反应堆的功率压缩到研发试验台中。麻省理工学院等离子体科学与核聚变中心的研究人员使用数值仿真来计算并优化高级偏滤器实验的设计提案。

作者 JENNIFER SEGUI

太阳内部时时刻刻都在发生核聚变。氢原子核发生聚变形成更大的氦原子的过程会释放出大量辐射能, 并伴随着质量的损耗。尽管地球与太阳之间的平均距离约为 9300 万英里 (约合 1.50 亿公里), 我们还是能在地球上以太阳光的形式观察到这种能量。

50 多年来, 国际社会一直致力于研究将氢聚变作为一种清洁、安全、取之不尽的能源的可行性。在麻省理工学院 (MIT), 通过极高磁场的方法来实现聚变是一个重要的研究方向。MIT 的等离子体科学与聚变中心 (Plasma Science and Fusion Center, PSFC) 研究人员正在结合实验、前沿理论和数值仿真来确认及理解相关科学原理和技术, 希望能加速聚变能的开发。

高级偏滤器实验 (ADX) 是一种核聚变实验, 更具体地说, 它是由 PSFC 的研究人员提出的一种托卡马克实验, 用于短周期等离子体放电提供聚变反应堆的热通量、密度和温度 (图 1)。

托卡马克装置内的温度超过 1.5 亿摄氏度, 会造成电子从原子核脱离, 从而使气态氢燃料形成全电离的超高温等离子体。堆芯等离子体维持在一个环形或甜甜圈形状的真空容器中, 保持高压, 以便生成带有较高碰撞率的稠密等离子体。外部磁场对等离子体的限制和控制, 类似

于强引力场对太阳内核的影响, 因此会产生核聚变。

“高温超导体领域最新的一些研究使我们能设计出一个可以在更高磁场下工作的托卡马克装置, 将等离子体的性能提升到反应堆级。” PSFC 的机械工程师 Jeffrey Doody 解释说, “研究重点随即从改进等离子体的性能转为托卡马克装置内的支持系统。”

Doody 和他的同事正在借助数值仿真设计 ADX 的结构, 希望能维持反应堆级的热通量和磁场, 以便将它打造为功率排气系统和等离子体 - 材料相互作用的试验台, 来支持下一阶段聚变设备的开发。

⇒ 对抗等离子体破坏

ADX 真空容器的设计提案非常具有创新性, 它没有采用之前的单个柱体设计, 而是由五个呈轴对称的单独壳体构成, 如图 2 所示。这种模组设计能选出合适的电磁线圈, 用于测试不同的偏滤器配置, 其中, 功率排气系统中的偏滤器组件用于从托卡马克装置中移除聚变灰烬。当离子逃离等离子体控制磁场的限制后, 偏滤器将对其进行收集并将它们导出容器。

模组容器不仅要承受发生核聚变时所需的高热通量和磁场, 还要能承受等离

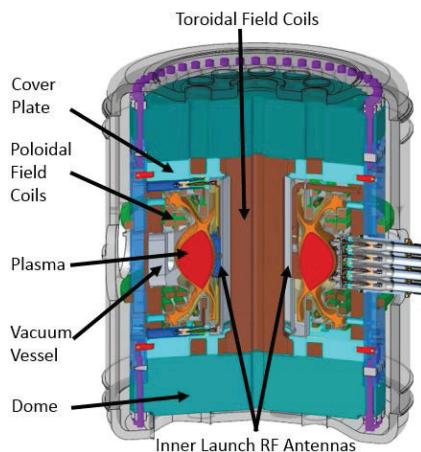


图 1 MIT PSFC 的 ADX 托卡马克设计装置图。图注: Toroidal Field Coils - 环向场线圈; Cover Plate - 盖板; Poloidal Field Coils - 极向场线圈; Plasma - 等离子体; Vacuum Vessel - 真空容器; Dome - 圆形凸面; Inner Launch RF Antennas - 内部视频发射天线。

子体破裂, 这是等离子体发生塌缩时真空容器壳体另一个应力源。

“为了评估 ADX 容器的设计, 首先我们在 COMSOL Multiphysics® 中执行了一个数值仿真, 用于预测磁场、涡电流以及由等离子体破裂产生的洛伦兹力。” Doody 解释说, “然后将计算得到的载荷施加在容器的单个结构模型中, 以便预测应力和位移。”图 3 为 ADX 循环对称磁场模型的几何结构, 包括容器、等离子体和极向电磁线圈, 负责将等离子体保持在平衡位置上。

等离子体会携带 150 万安培的电流

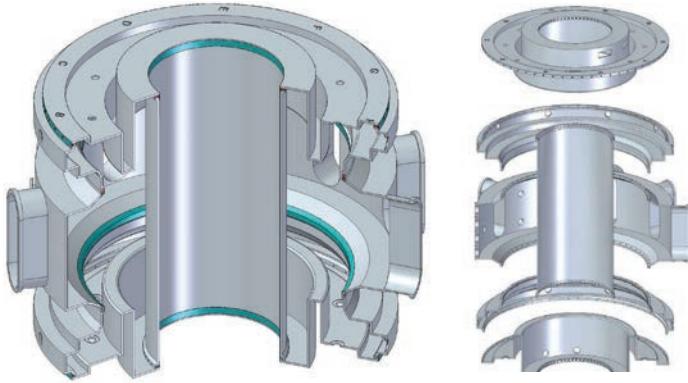


图 2 ADX 真空腔的设计很独特,由五个焊接在一起的单独壳体组成。

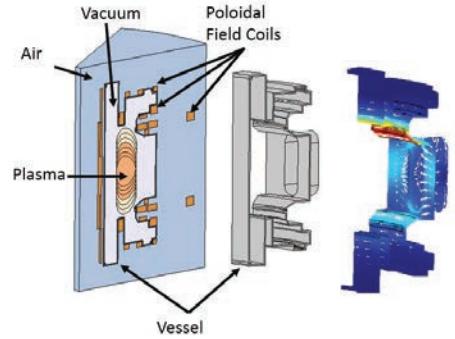


图 3 模型的几何结构(左),用于确定 ADX 真空腔壁中的涡电流(右)。

图注: Vacuum - 真空; Air - 空气; Plasma - 等离子体; Vessel - 容器; Poloidal Field Coils - 极向场线圈。

向上漂移,在 10 毫秒后停止移动,并在 1 毫秒内损失所有电流,这是垂直移动现象 (VDE) 中可能出现的最严重的等离子体破裂情况。破裂的等离子体周围磁场的迅速变化会在真空容器的壳体内产生电涡流。当电涡流通过托卡马克中用于限制等离子体的极向磁场和更强的环向磁场时,会在容器上产生洛伦兹力。

在 VDE 中,因为电涡流与容器壁

非常近,所以电涡流的幅值较大,因此, VDE 就是 ADX 计算模型的测试用例选择。图 3 展示了从数值模型中计算得到的电涡流分布。他们开发了第二个模型来确定由托卡马克中的环向磁场产生的洛伦兹力,而在第一个 ADX 模型中只加入了极向磁场。

⇒ 增强 ADX 真空容器

等离子体破裂会产生较强的洛伦兹力,并将作用在 ADX 壁上,对应于 VDE 中真空容器的上腔体和下腔体。如图 4 所示,在 ADX 容器的结构模型中,上下边界均连接在容器盖上,并且不会在仿真中发生位移。在相关边界上施加载荷,对应于作用在容器上的洛伦兹力。该测试案例确定了 150 万安培电流、6.5 特斯拉环向磁场强度下的托卡马克中的洛伦兹力。

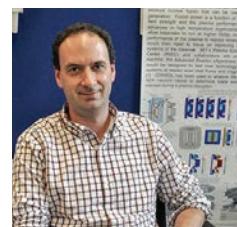
模组容器零件由铬镍铁合金 625 制成,这是一种强韧的镍基合金,对电流有较强的抵抗性,因此能尽量减少电涡流。材料的屈服应力是 460 兆帕,而 ADX 的设计标准规定容器

壁经受的应力不应超过 306 兆帕,即屈服应力值的 2/3。

数值仿真结果显示,如果不更改设计,由 VDE 产生的洛伦兹力将在容器中造成接近材料屈服值的较大应力,并会使结构发生 1 厘米的挠曲。为了加固真空容器,设计中增加了一个支撑块用于固定容器的另一个边壁,如图 4 (下) 所示。从安装支撑块后的仿真结果中可以看到,容器壁的应力和位移出现了明显的下降,说明加固后的真空容器能够承受等离子体的破坏,并支持 ADX 的运行。

⇒ 未来计划

以模拟仿真为导向的设计方法将保证 ADX 在 PSFC 的安全与成功运行。最终,它将发展成为最新型的聚变设备,并能为测试聚变反应堆中需要的偏滤器概念提供一个优秀的研发平台。❖



Jeffrey Doody 是 MIT 等离子体科学与核聚变中心的机械工程师。

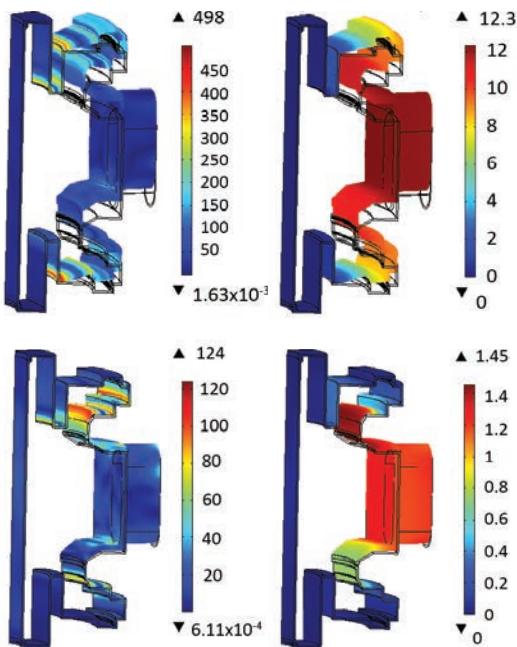


图 4 ADX 结构模型的几何结构,紫色边界为结构的固定位置(上)。应力和位移的仿真结果说明需要对设计进行加固。当在 ADX 设计中增加支撑块后,模型几何结构显示了对应的新增固定边界(下)。

发电机断路器优化

——多物理场仿真为发电厂提供安全保障

瑞士 ABB 集团使用仿真技术提高了发电机断路器的载流能力, 保护全球的发电厂免遭电涌破坏, 为不间断发电提供了保障。

作者 **ZACK CONRAD**

发电厂是现代社会的支柱。发电系统的故障防护装置是其中不可或缺的重要部分。不管是核电、煤电还是水电, 发电厂都采用了同一种保险与防护措施: 发电机断路器 (GCB)。GCB 能够保护发电厂免受电涌的侵害, 在发电厂保护中起着关键作用 (图 1)。错误的布线或电网问题常会引起的短路故障电流, 具有潜在危害。即使是最小的故障, 也可能造成数百万美元的损失。而 GCB 能够在几十毫秒内切断电流, 保护重要的电力资产免遭损坏。ABB 集团在电气化产品、机器人、工业自动化和电网等多个领域都处于全球领先地位, 该集团研发的 GCB 被世界各地的发电站广泛采用, 为发电站的运行提供保护。

处理短路电涌的难点在于, 电网或发电机中出现这类电流的时间完全是随机的。基于这一原因, GCB 需要具备极高的可靠性和非同一般的有效性, 即使长时间处于休眠状态, 当电涌出现时, GCB 依然能够完美地完成任务。发电机正常运转时, GCB 只是电路中一个常规的低电阻零件, 用于连接发电机与变压器及电网。日常运行中以可靠的方式将产生的电能传输给高压输电系统。但在紧急情况下, 它必须能够中断高于正常工况数倍的电流并将其消除, 从而保护其他元件不会受到损坏。

⇒ 使用郁金香式接地开关实现系统接地

ABB 集团研发的 GCB 服务于全球数以千计的发电厂, 其使用寿命至少能达到 30 年, 因此能够为发电厂提供安全可靠的连接。但 ABB 的工程师 Francesco Agostini、Alberto Zanetti 和 Jean-Claude Mauroux 并不满足于现状, 他们认为只有不断改进现有设计, 才能跟得上现代社会的需求。产品的升级版本研发完成后, 必须要经过大量的测试并满足相应标准才能进入商用阶段。这些标准

中有一部分是针对断路器系统中的关键安全组件——接地开关 (图 2) 提出的。Mauroux 解释说, 接地开关的任务是将系统的带电部分接地, 即与地面进行电串联, 同时也肩负着保护设备作业人员生命安全的责任, 所以不管处在多么恶劣的气候条件下, 接地开关都必须安全可靠。

接地开关的设计需要达到一种微妙的平衡状态。ABB 集团所采用的接地开关设计是知名的郁金香式结构: 由表面镀银的固定栓以及可滑动的触指构成。这种设计提供了一种可分离的连接方式, 既能使电流顺利传输通过, 又能保证弹簧对每个触指施加静态压力。采用郁金香式结构主要出于两方面的考虑: 一方面, 根据国际电工委员会制定的标准, 触指闭合时, 接地开关必须能够承受短路故障时的全部电流 (图 3); 另一方面, 巨大的短路电流会产生非常大的电磁力, 随之带来的负面影响必须得到控制。

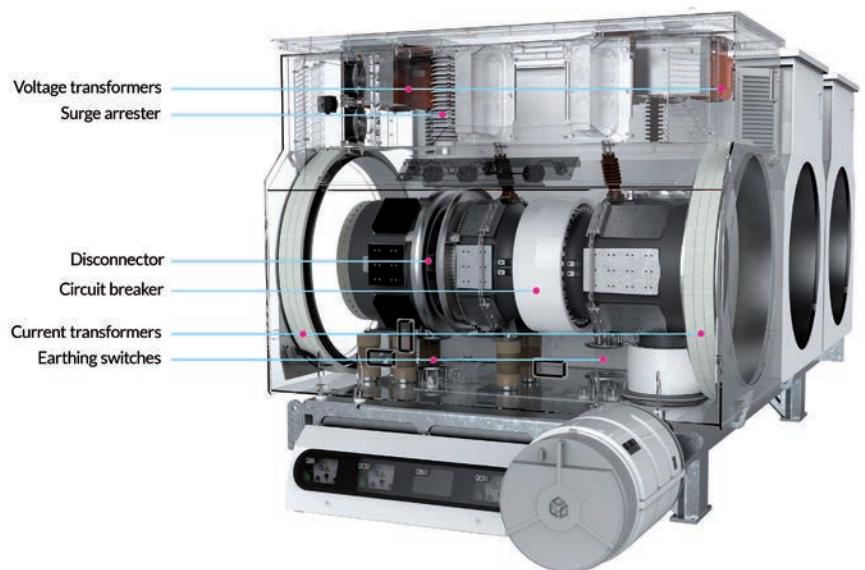


图 1 ABB 发电机断路器 (HEC10-210) 的内视图。

图注: Voltage transformers - 电压互感器; Surge arrester - 电涌放电器; Disconnectors - 隔离开关; Circuit breaker - 断路器; Current transformers - 电流互感器; Earthing switches - 接地开关。图片来源: ABB。

TYPICAL SINGLE LINE DIAGRAM

- 1. Generator circuit breaker
- 2. Series disconnector
- 3. Capacitors
- 4. Starting disconnector for SFC
- 5. Manual short-circuit connection
- 6. Earthing switches**
- 7. Current transformers
- 8. Potential transformers
- 9. Surge arresters
- 10. Motorized short-circuit connection

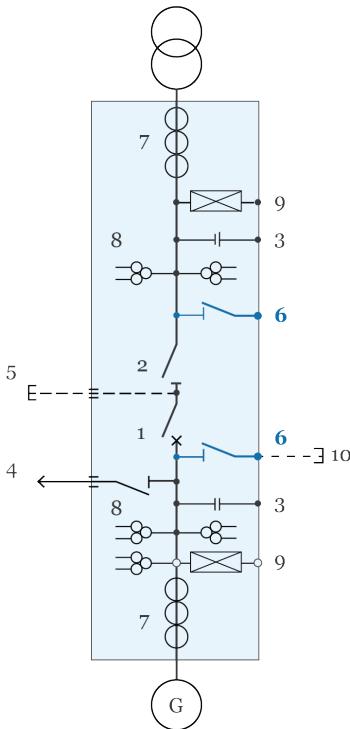


图 2 典型的断路器系统单线图, 图中标注了接地开关的位置。

图注:Generator circuit breaker - 发电机断路器; Series disconnector - 串联隔离开关; Capacitor - 电容器; Starting disconnector for SFC - 静态变频器(SFC)启动隔离开关; Manual short-circuit connection - 手动短路连接; Earthing switches - 接地开关; Current transformers - 电流互感器; Potential transformer - 电压互感器; Surge arrester - 电涌放电器; Motorized short-circuit connection - 自动短路连接。

尽管工程师们最终关注的是接地开关触头系统的载流能力, 但触头上的接触力会影响载流能力。为了解接触力对载流能力的复杂影响, Agostini、Zanetti 和 Mauroux 在多物理场仿真的帮助下对触头上的全部作用力进行了量化分析。他们利用 COMSOL 软件构建了一个接地开关的郁金香式触头模型, 借此模拟触头上机电的耦合特性。

⇒ **触指、磁场与作用力**

郁金香式触头的触指将受到双重电磁力作用: 一种是由于接触位置存在电接触点而产生的霍尔姆力 (Holm-force), 具有排斥作用; 另一种是洛伦兹力 (即载流体在磁场中所受到的力),

具有吸引作用。问题就在于要保证吸引力远远大于排斥力。如果触指之间的排斥力过大, 就会导致接触力减小, 从而可能造成触指分离。此时触头的电阻值会显著增加, 电阻损耗也会升高, 随之出现的情况是触头急剧升温。而高温可能将

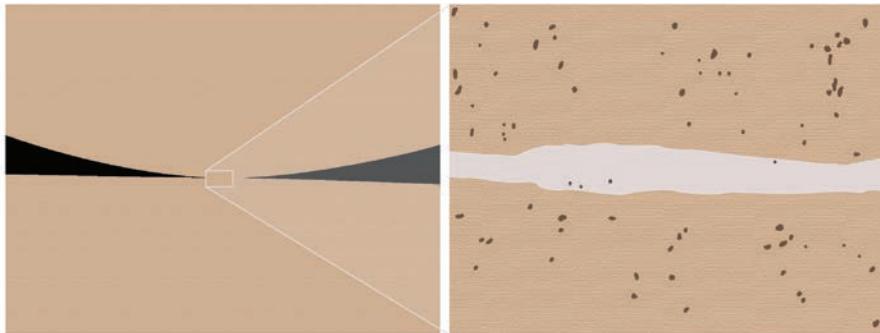


图 4 焊接区域。焊接尖端(上部)伸进销(下部)的横截面(左); 焊接区域局部放大图显示了用于形成合金的熔融金属的生成和凝固过程(右)。图片来源:ABB。

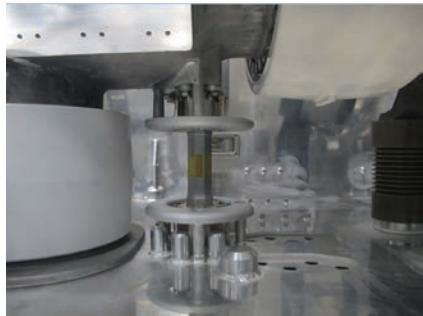


图 3 GCB 中处于闭合状态的接地开关。移动销连接了上下的郁金香式触头。图片来源:ABB。

触头焊接在一起, 最终损坏 GCB 和接地开关, 因此触头的接触力必须足够大。遵循洛伦兹定律所揭示的物理原理, 研究人员采用郁金香式触头从本质上解决了这一问题。焊接电流承载能力进一步证明了维持强大接触力的必要性。郁金香式结构设计在获得足够大的焊接电流承载能力和消除排斥电磁力方面起着至关重要的作用。因为能够承受很高的焊接电流, 所以郁金香式触头在消除大电流荷载时 (图 4), 并不会被焊接到一起, 从而确保了整个 GCB 结构在极端条件下能够安全可靠地运行。Mauroux 解释说, 郁金香式结构不仅仅是一种分离触头结构, 这种设计还能使平板弹簧向触指施加静态径向压力。这是因为洛伦兹力的增大有助于增加接触力, 从而达到更高的焊接电流承载能力。

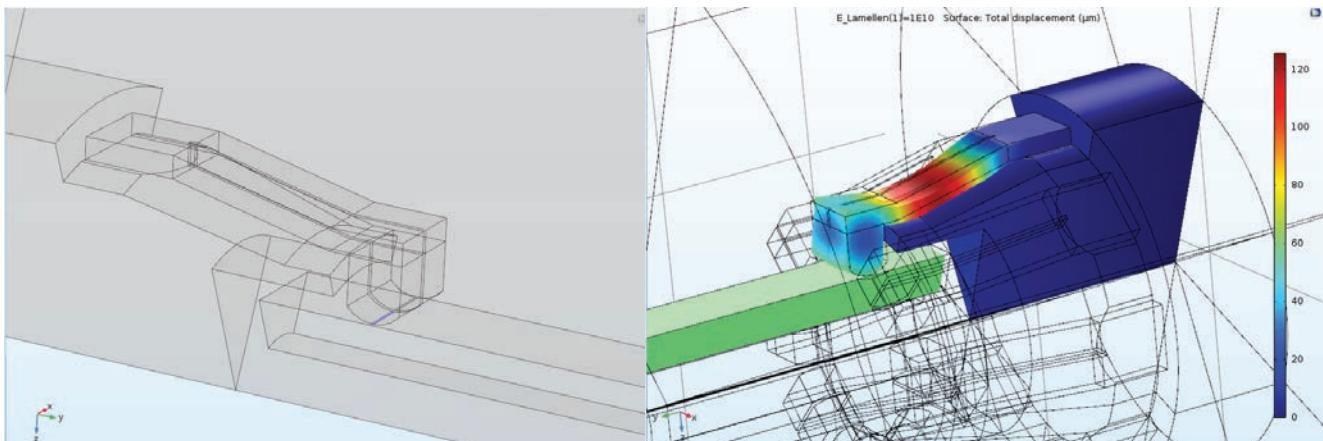


图5 触头的几何图形(左); 郁金香式设计的单个触指的变形情况(右)。图片来源:ABB。

计算触点上的总作用力需要耦合多种类型的物理场:如电流在通过每个触指时,都会产生磁场,每个磁场又会对其他带电触指产生不同大小的作用力。借助多物理场仿真,该团队利用多种方式对力进行了计算。计算结果的鲁棒性和可信度经过了实验的验证。团队基于断路器系统的对称性,简化了模型,只需模拟单个触指(图5和图6)即可捕获整个郁金香式触头的特性,从而将计算成本减少到全模型的1/8。利用麦克斯韦应力张量公式,研究人员计算了触指所受到的洛伦兹力。计算结果证实了触指受到的吸引力大于霍尔姆排斥力,从而保证郁金香式设计可以有效防止触指分离。在此基础上,研究人员利用模拟得到的合力数值,进一步计算出了理论焊接电流值,从而证明郁金香式断路器系统能够承受更大的焊接电流。

⇒ 仿真与实验携手并进

完成仿真后,实际设计结果还需要经历多个测试流程。这些测试不仅包括防止电气故障的介电测试、机械耐久性测试和工作温度测试,还要经过最后一关(可能也是最重要的一关):KEMA功

率测试。这项测试会通过实验验证产品的理论电流值,从而确保产品符合国际电工委员会规定的载流量标准。为了确定焊接电流的测量值,测试人员对设计进行了实物测量,他们将断路器开关暴露于类似发电厂的环境中,只有可传输的峰值电流超过500 kA的开关才能获得认证。“我们的设计轻松地通过了此类测试,证明仿真和实验能够协同工作。”Agostini说道,“COMSOL软件是一款可与实证检验强强联合的优秀工具。我们能够在直观的用户界面中有序地添加不同的物理场。”

⇒ 完整的电-热-力学模型

团队的最终目标是创建一个完整的电-热-力学模型,从而模拟更复杂的结构设计,全面理解接地开关中的物理特性。他们还计划详细分析了触头焊接机制背后的物理与化学过程。Mauroux表示:“材料选择和改进方面的持续进步,是提高产品性能和可靠性的根基。

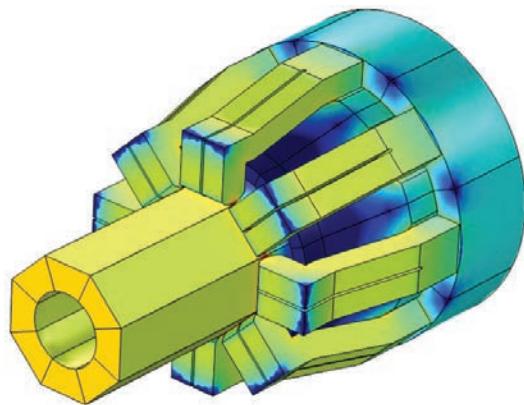


图6 郁金香式触头的电流密度对数分布情况。图片来源:ABB。

仿真工具变得越来越成熟,应用也将越来越广泛。我们相信,即使未来面对的模拟场景更为复杂,COMSOL也一定能够胜任各种挑战。”❖



从左至右: Markus Bujotzek, GCB 技术总监; Francesco Agostini, GCB 技术研发部和材料部主管; Jean Claude Mauroux, 首席工程师, GCB 技术研发部; Alberto Zanetti, 研发工程师, 材料部。

电弧模拟

——找出卫星系统中的电弧区域

卫星在轨道中运行时会发生电弧放电, 这种现象可能会导致系统故障, 但对其进行预测却极为困难。俄罗斯强电流电子学研究所的工程师借助多物理场仿真软件, 找到了故障最初发生的临界区域, 从而为机载设备提供了及时的保护。

作者 **GEMMA CHURCH**

波音卫星系统 (Boeing Satellite Systems) 公司在 1995 年推出了一系列新型通信卫星平台, 平台包含电力系统、控制系统和推进系统。研发人员将高压母线与 100 V 的稳定电源相连接, 取代了原先 27 V 的标准电压。这一全新的配置通过增加工作电压降低了工作电流, 并相应地减少了导体中的电阻损耗。然而这一改进却给卫星的电气系统带来了潜在的灾难性故障——电弧 (图 1)。

位于俄罗斯托木斯克 (Tomsk) 的强电流电子学研究所 (Russian Institute of High Current Electronics) 的研究员 Vasily Kozhevnikov 解释说: “新的工作电压标准导致电路板上的元件之间可能会产生电弧现象。当初在设计中为了尽可能地减轻卫星的质量, 并没有在电路板机箱的内部空间填充绝缘

体, 也没有将内部空间建造为真空环境。然而, 这种设计却可能导致电弧放电或放电连锁反应, 从而影响到大量的机载设备。”

“车载卫星系统内的电弧现象通常会导致局部或整体故障。在大多数情况下, 这些故障会导致卫星报废。”他补充道。

这项研究与极端条件下的气体放电

现象密切相关。在极端条件下, 电气设备的运行并不会完全遵循常规的物理原理。举例来说, 放电有时会发生在阈值 (通常被称为 Paschen 最小值) 之下, 这时的电压较低, 通常并不足以在两个电极之间引发放电或电弧。

Kozhevnikov 表示, “我们认为, 这项研究将来可以用于诊断压力、电离水平等各类外部参数对电气设备运行状

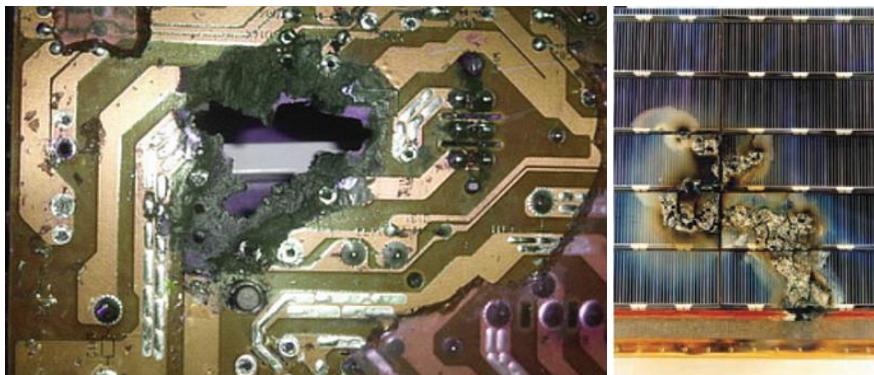


图 1 工作电压为 100 V 的电源中因电弧造成的损坏。

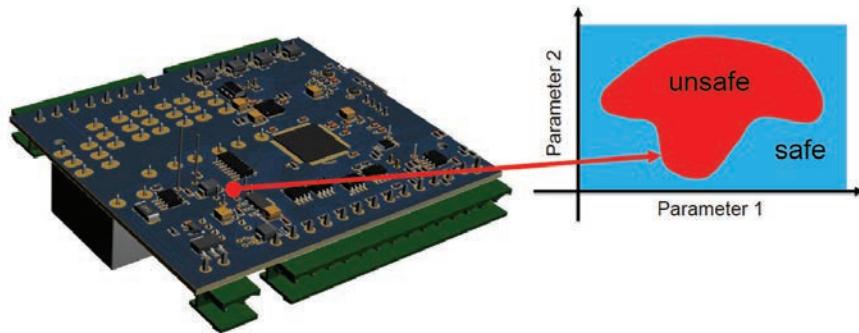
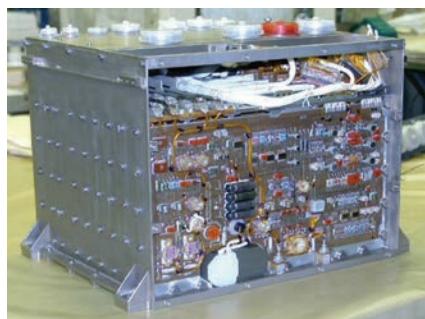


图 2 卫星设备专用电路板示例图。临界区域的宽度不足 5 mm。强电流电子学研究所的工程师必须确定不安全的工作条件范围以及相关特性, 并据此来设计能够在卫星上运行且不易遭受破坏的系统。

况的影响。除航天工业和太空科学之外，此项研究还具有更为广阔的应用前景。”

随着电气系统越来越多地应用于极端环境，电弧已不仅仅是民用航天工业面临的问题，它将影响到所有需要长时间自动运行、且对容错能力要求高的电气设备。因此，电弧问题解决方案的适用范围已从太空中的卫星延伸到了地面系统和水下设备。

⇒ 寻找临界区域

为了防止自持电弧破坏机载电气设备，就必须确定发生自持放电的区域，即所谓的“临界区域”。一旦找到了潜在的问题区域，工程师便可进一步对触发电弧放电的原因进行研究。

“在 COMSOL 的帮助下，研究人员无需再自行编写计算代码，便能够顺利地执行研究。我们期待这款软件未来能在气体放电研究中发挥更大的作用。”

—— VASILY YU. KOZHEVNIKOV, 强电流电子学研究所助理研究员

实验室研究无法完整复现空间轨道内的运行参数范围，因此无法胜任识别电子热区这一任务。仿真，作为唯一可选的研究工具，依然面临着巨大的挑战。

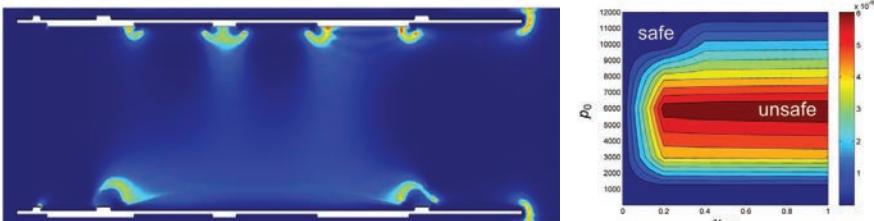


图 4 自持放电阶段的电子密度分布，这个二维模型来源于在卫星电源三维模型中定义的临界区域(左)；临界参数示例图显示了临界区域内压力与电子发射之间的关系，彩色图指示放电电流密度的水平(右)。

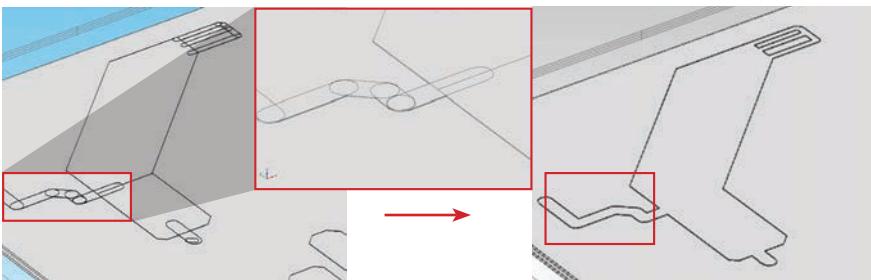


图 3 COMSOL 软件的几何修正功能。

一台常规的机载电气设备通常安装有多块印刷电路板，这些电路板被置于金属外壳之中，并分布在大片区域内(图 2)。

Kozhevnikov 解释说：“对放电现象进行数值仿真分析是识别潜在自持放电区域的唯一方法。然而，放电既是多物理场问题，又是多尺度问题。考虑到所需要的计算资源，分析如此大规模的仿真问题是极其困难的。”

⇒ 捕捉几何结构的误差

托木斯克的研究团队致力于寻找一种既准确又实用的计算方法。他们提出了一种基于计算工具的“分解”方法：不对整个电气设备运行完整的直流放电仿真，而是创建一个定制化的仿真 App，这个 App 可以自动分割并分析设备模型，找出最可能的临界区域。为了实现这一目标，他们采用了 COMSOL Multiphysics® 软件及内置的“App 开

发器”工具来创建用于支持整个模拟过程的多物理场模型。

前处理是一个重要的建模步骤，其作用在于施加正确的边界条件和导入真实机载电气系统的详细几何结构。

研究团队在“App 开发器”中利用自定义的三维宏模型方法(3D macro-model method)执行了前处理。此外，他们还采用了自己导入的引擎模型，可自动修正对象边界。Kozhevnikov 解释说，三维宏模型方法包含了导入功能和自动修正对象边界的功能(图 3)。若没有自动修正功能，这些误差可能会导致仿真分析无法运行。

⇒ 解析等离子体物理问题

完成了前处理后，研究人员采用的建模方法包含以下三个阶段：对三维模型中的潜在临界区域进行初步静电分析；利用关联二维模型推算出场增强区域，并对临界区域进行定义；对临界区域进行直流放电模拟，进一步研究重要参数。

最初选择使用 COMSOL 软件，是因为只有这款软件能够全面地描述二次直流放电理论模型的全部特征，而且还支持用户修改必要的参数。研究人员通过仿真对电子密度的分布进行了分析，并确定了临界区域的位置(图 4)。

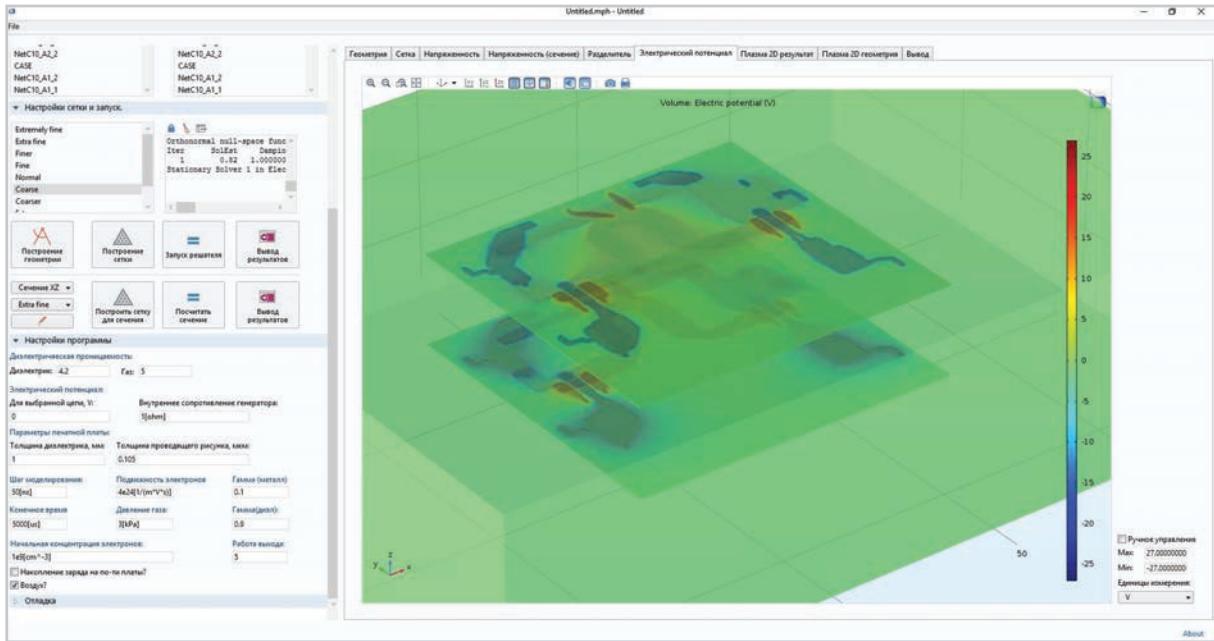


图5 借助 Kozhevnikov 开发的多物理场仿真 App，研究人员可以修改压力和电子发射等参数，从而找到自持放电最可能发生的区域。此仿真 App 将电弧定位与特定放电阶段的研究相结合，无需进行全尺度的直流放电仿真，其中提供了一系列结果，包括整个电路系统的电势。

Kozhevnikov 解释说：“COMSOL Multiphysics 从各方面满足了研究项目中对运行电压范围分析的需求。相比于粒子模拟（Particle-in-Cell, PIC）仿真，COMSOL 仿真在等电压和高压分析方面更加快速、简便。”

“PIC 仿真的计算成本过高，显然并非此类问题的最佳解决方案。简化模型配置（例如气体放电二极管）的方法虽然可行，然而达到中等压力后，这种方法所耗费的时间可能是 COMSOL 仿真的 5~20 倍。对于此类结构，COMSOL 的平均计算时间少于两个小时。”

图 5 展示了研究团队创建的定制化仿真 App。仿真 App 中隐藏了构建模型时涉及到的复杂物理场，因此用户在使用仿真 App 时只会接触到与自己分析工作相关的参数，但是用户可以添加自定义命令和算法。

Kozhevnikov 表示：“具体来说，在 COMSOL 的帮助下，研究人员无需

再自行编写计算代码，便能够顺利地执行研究，而这本来是一项非常复杂的工作。我们期待这款软件未来能在气体放电研究中发挥更大的作用。”此外，CAD 导入功能、“App 开发器”等丰富的前处理和后处理工具也是团队选择 COMSOL 软件的原因。

⇒ 仿真对轨道空间和跨学科研究的影响

仿真分析与物理实验相结合的方法，为研究提供了更广阔的空间。Kozhevnikov 进一步解释说，“如果将来能够进行无损检测，COMSOL 仿真将通过排除非关键零件的方式来缩小实验的测试区域。在我们的项目合作框架下，强电流电子学研究所真空电子实验室的同事们正在致力于无损检测的开发。”

“在航天器产业中，自动

化软件系统的适应性应当能够保证软件自身的长期运行。”他补充道，“航天器产业的标准会经常变更，因此很难解释这些变化带来的全部影响。我们虽然已经解决了电弧诊断问题，然而随着电压上升，我们预计还需要对部分机载电气设备进行设计，以使其能适应新的运行条件。简单来说，如果某些设备的运行状况与‘正常情况’存在明显差异，工作人员便需要以某种方式对其结构进行重建。我们的仿真 App 为印刷电路板的重新设计提供了参考建议，使它能更好地抵抗电弧。仿真 App 亦可用于设计具有容错性的电气系统。”



Vasily Yu. Kozhevnikov, 2008 年在俄罗斯托木斯克国立大学获得理论物理学博士学位。自 2008 年起，他一直担任俄罗斯科学院西伯利亚分院强电流电子学研究所理论物理实验室（托木斯克）的助理研究员。从 2012 年到现在，他使用 COMSOL 软件进行了大量的研究。

大规模集群计算

——借助高性能计算仿真优化大功率电子器件

COMSOL Multiphysics® 及其高性能计算性能, 使我们能用比以往快得多的速度向客户交付最好的设计。

作者 **DEXTER JOHNSON**

BLOCK 集团 (Block Transformatoren Elektronik) 是线圈类产品的领先制造商, 其产品广泛应用于各行各业, 特别是电子产品应用。

在设计各类定制变压器、电源、EMC 滤波器与电抗器 (图 1) 时, BLOCK 公司的工程师不仅要保证工作频率、产品尺寸及质量、电源损耗、电绝缘等符合规格要求, 还要保证产品能适应不同的环境条件, 包括灰尘、温度变化和湿度等; 此外, 这类设备通常还要满足 30 年使用寿命的要求。

“客户的具体应用可能会限制可用的材料,” 负责 BLOCK 所有仿真工作的 Marek Siatkowski 说道, “例如, 在铁路应用中, 材料必须要满足各类严格的要求, 包括可燃性标准、发生火灾时的烟气毒性, 等等。所以我们的工作并非只是打开产品目录, 让客户从中选一个那么简单。客户会指定尺寸和具体要求, 每次我们都必须进行一组新的计算。”

BLOCK 发现在这样的情况下, 公司的仿真软件已经过时, 电感器和变压器的设计难度变得越来越高。为了节省成本并向客户提供更好的服务, 公司需要找到一个方法, 能够在最终确定设计之前减少需要制造的原型机数量。

有了这样的想法之后, 因为 COMSOL Multiphysics® 软件灵

活、易于使用, 并且支持高性能计算 (HPC), 所以 BLOCK 公司就开始使用 COMSOL® 软件。

“我们模拟了新的元件, 以便找出其中的关键区域, 例如, 电磁损耗很高, 或者元件温度达到某个阈值的区域。” Siatkowski 说, “利用 COMSOL 软件, 我们可以找出这些区域并模拟相关的物理效应, 从而快速精确地找出改进设计的方法。”

在 BLOCK 的测试实验室, 研发部门正在分析一些软磁材料的磁性特征和磁滞损耗。公司选用 COMSOL 软件的一个主要原因是, 用户可以轻松地向软件中插入他们对磁性的研究中所开发的公式, 并将其用于仿真。

⇒ HPC 带来更大的突破

除了多物理场仿真, BLOCK 还充分利用了 COMSOL Multiphysics 提供的 HPC 功能: 他们可以在不限核数的多核工作站和不限计算节点的集群中运行仿真。不论是工作站还是集群, 都可以帮助提升效率; 现在, 他们的研发团队可以快速地为客户交付出最好的产品。

Siatkowski 通过使用 COMSOL 为多个 BLOCK 元件开发了模型, 通常很难对这些器件进行解析计算。他可以



图 1 用于滤除电流尖刺的电源优化器, 减少了电源中谐波电流的注入。

基于一些参数和客户的具体需求来建立几何模型, Siatkowski 为直流电感器开发的模型就是这样一个例子。

“利用 COMSOL, 我可以运行一个包含多个参数的仿真, 例如线圈的宽度、高度和厚度, 还可以探索由我们的团队和客户定义的整个设计空间。现在, 我们的产品开发人员和销售团队可以更加高效和轻松地找出最佳解决方案。” Siatkowski 解释说。

⇒ 一切基于架构

“对于较小的模型, 我可以直接在我的工作stations上开发模型并进行计算。” Siatkowski 说, “但对于更大的模型, 我的工作stations依然不够快, 内存也不够大。”

这时 COMSOL 灵活的特性就发挥了重要的作用, 它的软件架构和“慷慨”的许可证机制使它支持 HPC, BLOCK 充分利用了这一点。之后, Siatkowski 开始在包含多个内核的数台计算机上运行他的模型。“

我正在使用一个包含 22 个内核及 272 GB 随机存取存储器 (RAM) 的集群, 可以在这里轻松地远程运行我的仿真。” Siatkowski 说, “COMSOL 支持

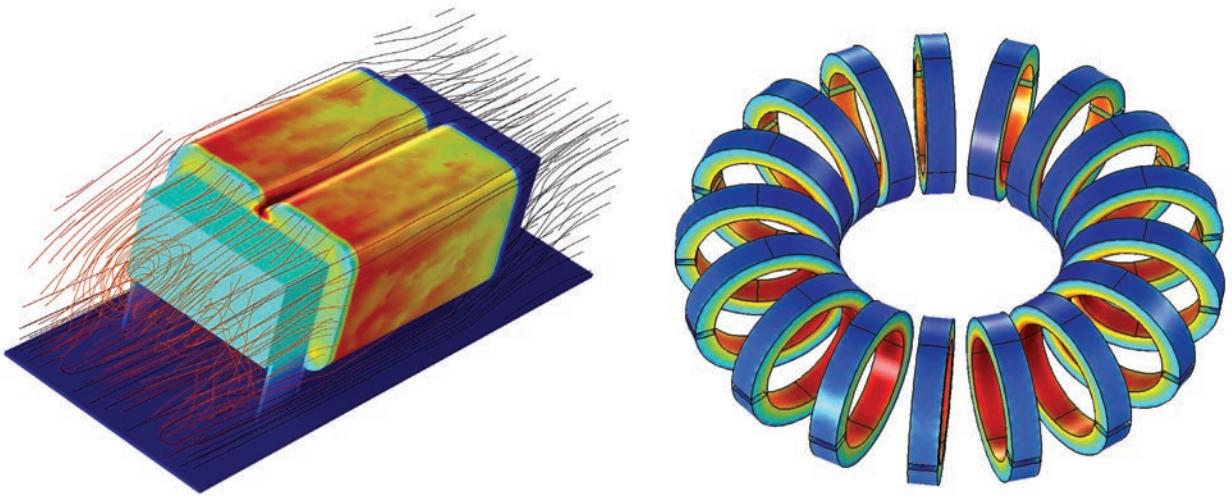


图2 空气冷却型直流电感器的仿真,显示了温度分布和速度流线(左);环形电感器的磁通密度(右)。将电感作为线圈内径、外径和厚度的函数,通过数值仿真确定。

分布式内存并行计算,集群的每个节点也可以从本地共享内存式并行计算中受益;这意味着我可以最大限度地利用所有可用的硬件。”图3显示了一个大型的电气研究中每周获得的仿真加速情况。

在高性能计算机上运行仿真后, Siatkowski 可以在他的工作站上查看结果,并对结果进行后处理。“这样做的优势是,运行仿真时,我的工作站是空闲的,因此可以做其他一些工作,甚至能对其他模型进行前处理或后处理。COM-SOL 软件的架构帮我们提升了生产力,使我们能为客户提供更好的服务。” ❖

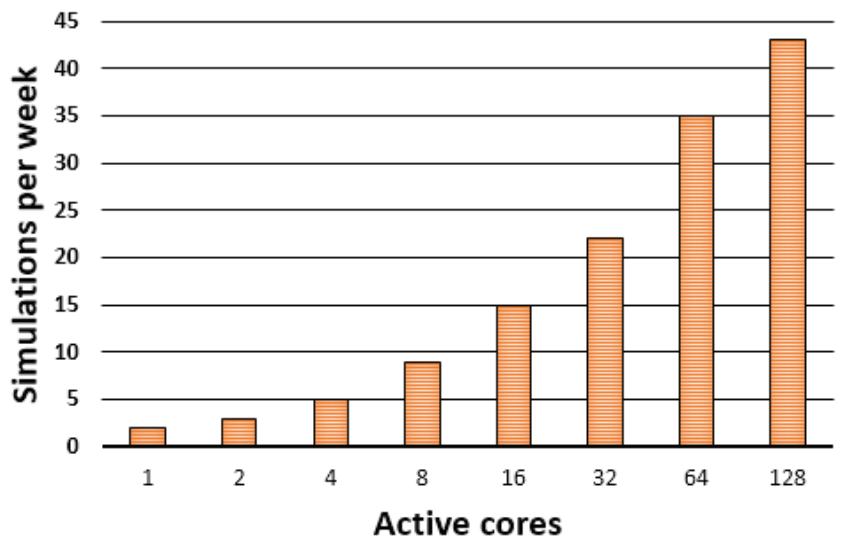
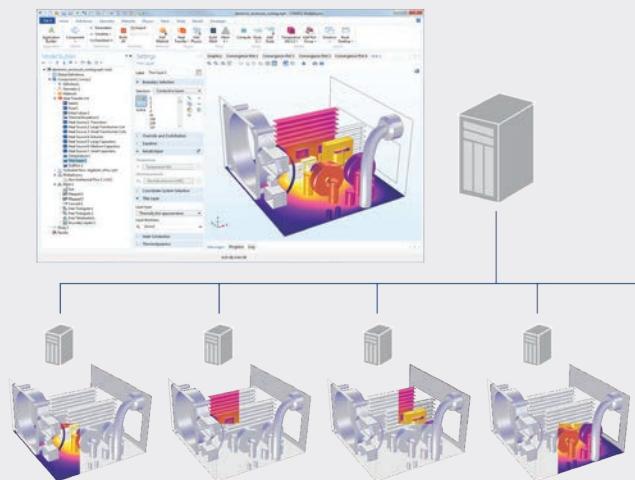


图3 从单个8核工作站移到小型集群后,计算性能明显提升。

COMSOL Multiphysics® 的并行运算

使用 COMSOL Multiphysics® 软件时,一个网络浮动许可证(FNL)支持使用任意数量的CPU内核、集群节点和并行参数化研究。默认情况下,当您在多核处理器计算机上启动COMSOL® 软件时,所有可用核都将通过共享内存的方式实现并行运算。在工作站或集群上求解仿真时,用户可选择采用的内存共享方法,例如分布模式(集群并行)、共享模式(单机多核运行)或者混合模式。



电缆的水树分析

——仿真 App 助力电网的运行与维护

武汉南瑞的工程师们使用多物理场仿真技术优化电网的运行与维护, 开发了用于评估电缆运行状态的仿真模型, 并定制开发出电缆线路状态分析专家系统仿真 App, 从而提升了对电缆故障的预判能力以及故障检修速度。

作者 **QIQI ZHANG**

日常生活中不可缺少的电力资源, 主要通过电力电缆进行传输和分配。电线电缆被喻为国民经济的“血管”与“神经”, 是电力基础设施建设、新型智能电网、新能源产业中必不可少的基础产品。

随着经济的发展, 电缆线路的需求日益增加, 新增负载会导致电网参数波动或瞬间干扰, 从而导致电力品质下降, 引起电网设备的运行故障, 极端情况下还会引发火灾等严重事故。为保证居民生活和工业生产的正常运行, 电缆系统设备的日常维护是保证顺利供电的重要手段; 而电缆出现故障后如何及时修复, 也成为亟待解决的问题。

⇒ 电网的运行维护

电力设备的运行情况就像人体的健康状况一样, 需要定期进行状态评估, 以防止突然断电的情况发生。对电缆的健康评估通常需要借助检测设备 (比如红外、紫外和局部放电等), 通过检测的结果判断电缆设备的状态。然而, 仅依靠单一的检测设备往往难以全面地反映电缆的状态或判断电缆设备的故障类型; 而且, 电缆的架设环境各异, 例如埋于地下或隧道里, 或是架设在空中, 都会增加设备和人力检测的难度。同时, 电缆的运行环境、服役年限以及本身质量的不同也导致了很难有一个完整的体系对其

进行统一的评估。

为了有效分析电缆的健康状况, 维护电网的正常运转, 除了使用传统的检测设备进行测试以外, 工程师还需要考虑影响电缆健康不同因素, 如电缆本身的结构和材料、电缆中的杂质、电压波动及运行环境等, 从而对电缆进行全面的分析。

国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 (以下简称“武汉南瑞”) 是中国国家电网总公司下属的一所研究机构, 主要从事智能电网输变电相关产品的研发、设计、制造和工程服务, 其职责之一是为地方电力公司提供电力设备运行维护以及故障分析服务。武汉南瑞的工程师张静及其团队希望通过仿真模拟, 可以有效地分析不同因素引起的电场变化, 更好地反映电缆的健康状况, 以及准确地分析故障原因。

⇒ 仿真提升电缆健康评估

电缆结构复杂, 包含多层结构, 其中线芯通常由几根或几组导线绞合而成, 每组导线之间相互绝缘, 线芯外包有高度绝缘的覆盖层 (图 1)。当电缆的绝缘层中存在水分以及其他诱发因素 (如杂质、突起或者空间电荷) 时, 绝缘材料在水分和电场的作用下就会形成一些微型通道, 这些微通道多呈树状结构, 所以被

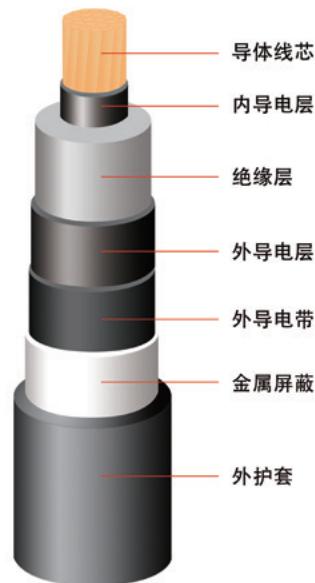


图 1 典型的电缆结构示意图。主要包含导体线芯、导电层、绝缘层以及金属屏蔽层等。

称为“水树”。在电缆正常工作时, 水分子在电场的作用下会不断聚集在缺陷部位, 导致绝缘层的机械损伤, 从而扩大绝缘体的损伤 (图 2)。在电力输送中, 水树是诱发高压电缆损坏的主要因素。

为了观察和理解上述因素对电缆健康状况的影响, 武汉南瑞的工程师使用 COMSOL Multiphysics® 软件对电缆进行模拟。“COMSOL Multiphysics 界面友好, 软件内的预置接口使建模仿真过程变得十分简单。”张静说道。张静和她的仿真团队使用了软件中的“AC/DC 模块”和模块中预置的“电流”接口对电缆在工作状态下的电场情况进行了模拟。电缆的故障模拟分两步完成: 首先设置电缆各层材料的结构参数 (半径) 和电学属性 (介电常数和导电率), 计算电缆在通入高压电后的正常电场结果; 然后分别加入杂质参数和水树层参数, 通过计算就可以得到分别存在杂质或水树层, 或者同时存在杂质和水树时的电场结果。“在评估电缆健康状况时,



图 2 褐色斑纹为电缆绝缘层在水分和电场同时作用下而产生的水树现象。

电缆各层的材料属性、水树和电缆中的杂质等因素都需要被考虑在内,而这些在 COMSOL 软件中都非常容易实现。”张静解释道。

将正常情况下的电场结果与存在杂质或水树这两种缺陷的电场结果进行对比,工程师可以评估杂质和水树对电缆的影响。正常电缆的电场只有沿导线半径指向屏蔽层的电力线,此时的电场分布才是均匀的。当存在杂质时,如图 3 所示,电场的均匀性受到破坏。当局部的电势差高于绝缘层可承受的电压时,电缆绝缘层将会在短时间内被击穿。“借助仿真来预测电缆在高压情况下的健康状况非常高效便捷。”张静说道,“通过对不同工况下的电缆电场进行模拟,我们可以快速评估由电缆中的缺陷引发的潜在风险,预测杂质和水树对电缆安全性能的影响。我们甚至可以通过设置改变杂质的种类及其在电缆中的位置、水树的大小以及电学性能等,对电缆的各种情况进行全面分析。”

⇒ 开发电缆状态分析仿真 App

对于武汉南瑞的仿真工程师而言,使用 COMSOL Multiphysics 软件来

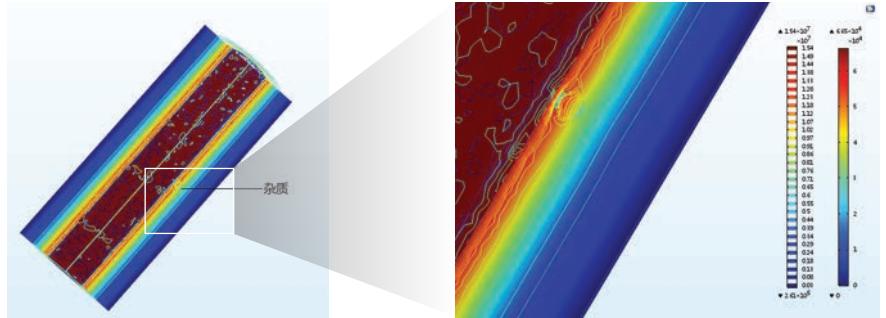


图 3 内含杂质的电缆仿真模型,其中显示电势分布图及电场模等值线。电缆轴向截面的电场模拟结果,杂质位于电缆的导电层与绝缘层交界位置(左);杂质位置处电场的局部放大图,显示了该处的电场异常(右)。

模拟电缆在不同情况下的电场性能,以及预估电缆的健康状况变得十分简单和便捷。如果前线的故障检修人员也能使用仿真进行电缆的运行状态预测,无疑会简化故障检修的工作流程,提高工作效率。但是当电缆出现问题时,由于一线故障检修人员缺少仿真专业技能的培训,通常难以基于实际情况使用仿真模型分析故障原因。当故障发生在较为偏远的地区时,调用电力专家进行现场勘查排除故障则需要花费几天甚至数周的时间。为使仿真模型能够为一线人员服务,降低使用要求,增加灵活性,张静工程师基于多物理场仿真模型,使用 COMSOL 软件自带的“App 开发器”,定制开发了专家系统仿真 App (图 4),从根本上解决了这一难题。使用此仿真 App,一线的检修人员也能方便地使用仿真模拟帮助他们分析故障原因,只需修改几个参数,就能运行仿真分析,而无需预先了解底层模型设置。

“电缆线路状态分析专家系统”仿真 App (图 4) 的用户界面友好简洁,用户可以直接输入不同的电缆参数,选择故障类型,即时调整仿真模型,直接计算并显示所需的结果。由于电缆设备的结构比较固定,一线故障检修人员只需针对故障的电缆线路先进行故障分类,

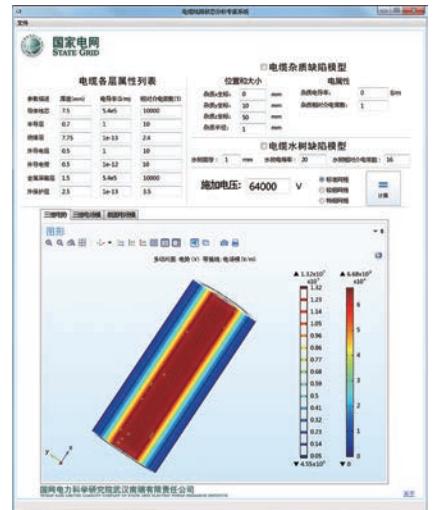


图 4 “电缆线路状态分析专家系统”仿真 App。用户可以修改电缆各层属性参数、杂质和水树参数,以及网格的尺寸等参数,从而评估电缆的性能。

然后在仿真 App 中选择已知的缺陷类型,输入实际数据,就可以很快得到电势和电场的报告,预估电缆的健康状况,从而判断是否需要对该电缆进行更换或维修。“仿真 App 在电缆维护工作中起到了关键的作用,不仅极大地提高了工作效率,也给一线同事在电缆故障的判断上带来更多自信。”张静说道。

目前,由武汉南瑞开发的“电缆线路状态分析专家系统”仿真 App 正服务于广西电网有限责任公司某下属单位,帮助电缆检修人员预判电缆故障,维护中国西南地区电网系统的正常运行。❖

COMSOL Multiphysics® 在电力行业中的应用案例模型

您可以从“案例下载”页面获取案例模型文件及相关文档：cn.comsol.com/models

- 母线板交流分析 (ID 28391)
- 电缆系列教学案例 (ID 43431)
- 三相电力变压器损耗的计算 (ID 54471)
- 电源开关的电动力学 (ID 33511)
- 感应电动机中的振动建模 (ID 47871)
- 永磁电机三维模型 (ID 47621)
- 矢量磁滞建模 (ID 20671)

