

多物理场仿真

COMSOL
赞助

IEEE
SPECTRUM

2017年10月



多物理场
多尺度
多速率

欧洲核子研究组织大型强子对撞机的
超导磁体失超分析

P 6

多物理场仿真助力设计创新

作者 MICHAEL FORSTER, IEEE 常务董事

多年来,我们与 COMSOL 公司合作,讲述了众多技术团队如何使用多物理场仿真推进设计创新的实例。

本年度的《多物理场仿真》杂志收录了来自各领域的成功案例,详述了行业巨头与先进研究机构如何利用多物理场仿真来加快产品研发和设计流程。

借助多物理场仿真设计工具,电动汽车公司、5G 组件制造商和大型科研团队成功地突破了项目中棘手的技术难题。

电动汽车制造商法拉第未来 (Faraday Future) 使用多物理场仿真将一台电动机的设计迭代次数从 10 次减少到 2 次。

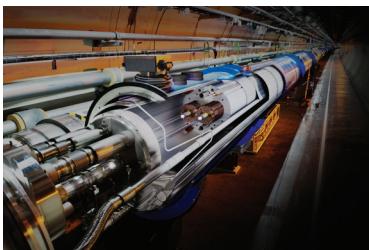
制造与咨询公司 Signal Microwave 正在生产高速射频产品的专用连接器。他们使用多物理场仿真优化设计,有效地实现了网络组件之间交错复杂的连接,这些部件是企业 5G 技术竞争中成功保持领先地位的关键。

隶属于欧洲核子研究组织 (CERN) 的大型强子对撞机团队设计了一个故障保护装置,用于避免对撞机因冷却系统意外关闭而造成严重的损失。

在上述案例中,数值仿真工具让用户能够以一种高效、低成本的方式来进行探索、验证并优化新概念,进而帮助用户获得了创新的设计和优异的产能。高性能的数值仿真工具已成为科技企业在瞬息万变的市场中赢得竞争必不可少的因素。

我衷心希望这本 COMSOL 特刊中呈现的创新设计案例能够激发你的设计灵感,成就技术创新。☺

封面图片:大型强子对撞机 (LHC) 的照片。图片由欧洲核子研究组织 (CERN) 提供。



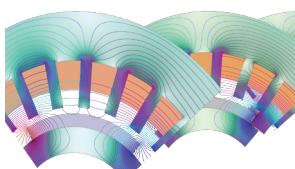
目录

3 如鸟类展翅,如飞机翱翔: 压电风扇周围的气流模式

—诺基亚贝尔实验室,爱尔兰

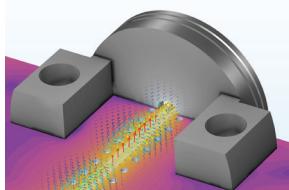
6 分析大型强子对撞机的 超导磁体失超

—欧洲核子研究中心,瑞士



10 电动汽车的新型 电动机设计

—法拉第未来,美国



13 隐形连接器开启 未来 5G 时代

—Signal Microwave,美国

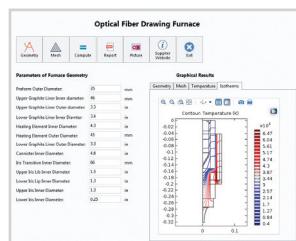
16 燃料电池有望在印 度取代柴油发电机

—印度国家化学实验室,印度



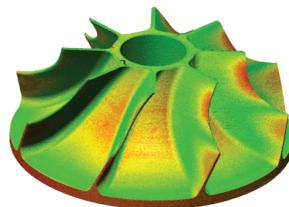
19 优化存储芯片的 剥离工艺

—Besl,瑞士



22 仿真 App 为 理工科课程注入活力

—哈特福德大学,美国



24 MTC 使用仿真 App 革新 增材制造零件的设计

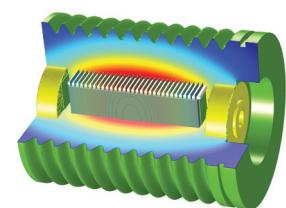
—MTC,英国

27 全新的高灵敏度压力 传感器

—坎皮纳斯大学和空军研究所,巴西

30 建模与仿真应对 电池设计难题

—COMSOL,美国



32 最好的工程设计都 来源于团队协作

—CDE,美国

如鸟类展翅, 如飞机翱翔: 压电风扇周围的气流形态仿真

为了寻求安静、可靠、低能耗的散热方案, 诺基亚贝尔实验室的工程师使用多物理场仿真捕捉压电风扇在振动过程中与周围气流之间的相互作用。

作者 SARAH FIELDS

从蛇蜿蜒的身姿、壁虎牢固的攀附力, 到猎豹飞奔的步幅, 仿生设计已逐渐进入机器人、电子产品和医疗设备等领域的创新制造中, 推动着科技的发展。近年来倍受关注的压电风扇, 就是受鸟类翅膀振动的启发而设计的。

如今的电子产品在体积上日趋小巧, 然而运行时间却不断增加, 导致设备的内部热负荷越来越大, 小巧紧凑的新型散热方案成为了应对此问题的关键。压电风扇包含一类特殊的压电材料, 当受到外加电压时, 这种材料会发生膨胀和收缩, 引起悬臂叶片的振动, 进而产生

“COMSOL 帮助我们大幅提升了全新几何模型的构建效率, 加快对设计的优化。”

— AKSHAT AGARWAL,
诺基亚贝尔实验室研发人员

气体流动。用压电材料制造的风扇具有性能稳定、功耗低以及噪音小等特点, 显示出了良好的应用前景。

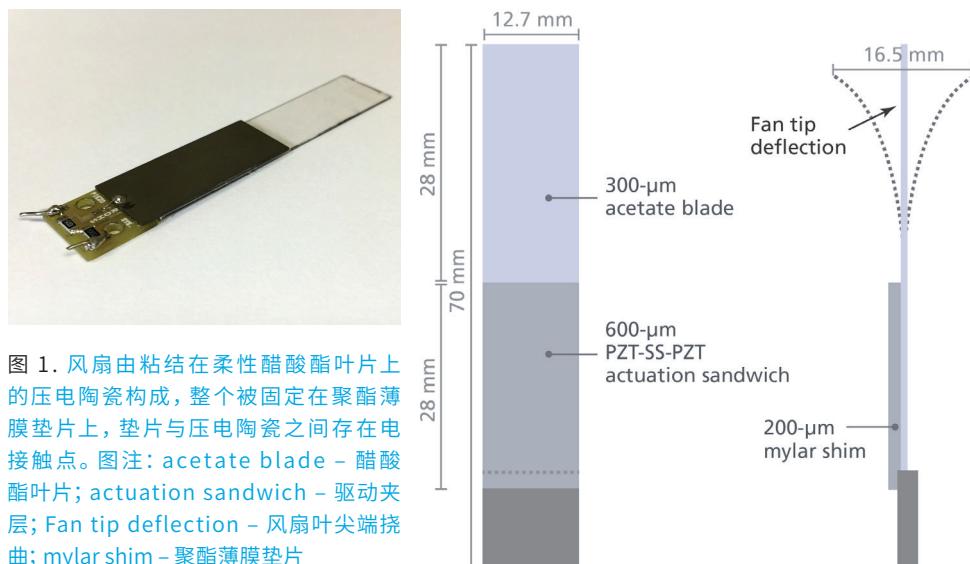
来自诺基亚贝尔实验室 (NokiaBellLabs) 的研究人员 Akshat Agarwal 也加入到了压电风扇技术的科学研究中, 他正在尝试对风扇周围的气流运动进行表征。这一研究不仅可以解释振动的扇叶周围的气流模式, 也适用于那些具有相似气流模式的其他应用领域。

» 自然对流与强制对流之间的跳板

针对长时间工作的电子设备, 设计人员一般依靠自然对流或由风扇产生的强制对流来进行散热。然而自然对流效率过低; 强制对流需要大量的电力维持, 难以按比例缩小以适应当下小巧的电子产品。

压电材料的散热原理介于自然对流和强制对流之间: 在外加电压的作用下, 压电材料反复膨胀与收缩, 引起相连的扇叶发生振动, 从而产生气流。Agarwal 解释说: “自然对流通常是首选的散热方式, 但是在某些情况下, 我们需要加入主动部件来激发空气的流动。压电风扇便充当了跳板的角色。” 诺基亚贝尔实验室使用的风扇叶片由粘结在醋酸酯叶片上的压电材料和聚酯薄膜垫片构成 (图 1)。

对小尺度动态系统的流



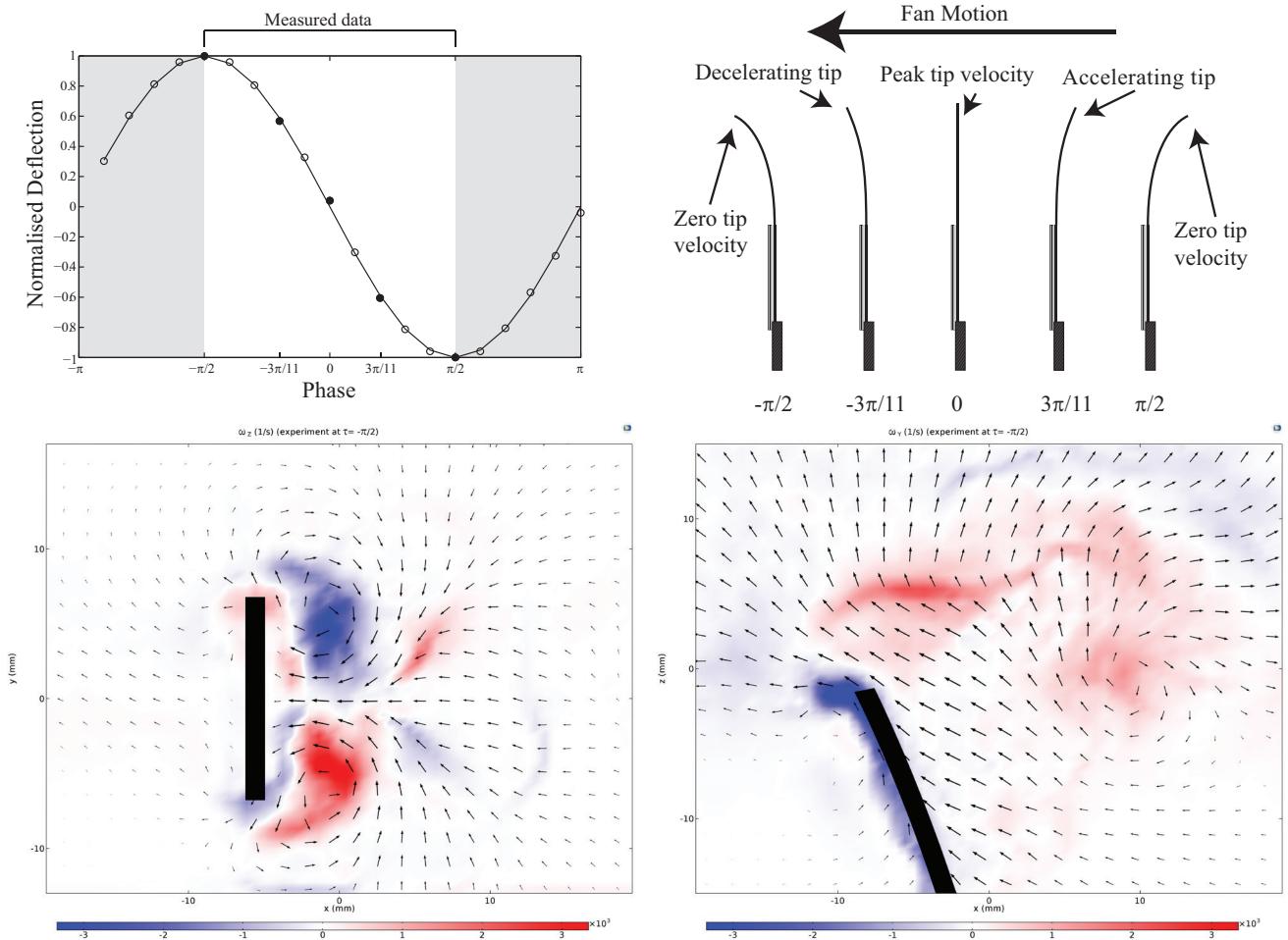


图 2. 左上图:锁相测量值绘图显示了风扇叶尖的无量纲位移。右上图:绘图显示了风扇在半周期内的偏转情况。下图:相位锁定 PIV 测量值展示了无约束的风扇产生的涡量(等值线图)和面内速度(矢量场)。图注:Zero tip velocity – 叶尖速度为零; Decelerating tip – 叶尖降速; Peak tip velocity – 叶尖峰值速度; Accelerating tip – 叶尖加速; Fan Motion – 风扇运动

体动力学特性进行描述是一件十分困难的事情。为了有效地捕捉叶片振动时周围的气流，诺基亚的工程师需要将二维仿真研究拓展为三维，并引入物理测试。

» 判断气流模式

作为实验的第一步，诺基亚贝尔实验室的工程师使用了粒子图像测速技术

(particle image velocimetry, 简称 PIV) 对流场进行锁相测量，以得到不受约束的风扇在自由空间的涡量和面内速度(图 2)。叶片在振动过程中共有 11 处位置，工程师在每个位置上采集了五个 x-y 平面和五个 x-z 平面的数据，由此获得了三维流场。

第二步是模拟叶片与空气的相互作用，借此进一步

深入了解系统。在选定仿真方法时，速度和准确性是两个需要考虑的关键因素。

“对于我们而言，能够尽快对叶片周围的流体流动进行准确模拟是非常重要的。” Agarwal 说，“这让我们能对设计执行虚拟迭代，进而研究扇叶在各种情景下表现出来的性能。”

工程师首先考察了相关

文献中的建模方法，这些方法的计算量很大，他们因而决定必须选择其他的方法。COMSOL® 软件占用计算资源较少，而且内置了任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 方法，此方法结合了基于欧拉 (Eulerian) 方法表述的流体流动方程与基于拉格朗日 (Lagrangian) 方法表述的

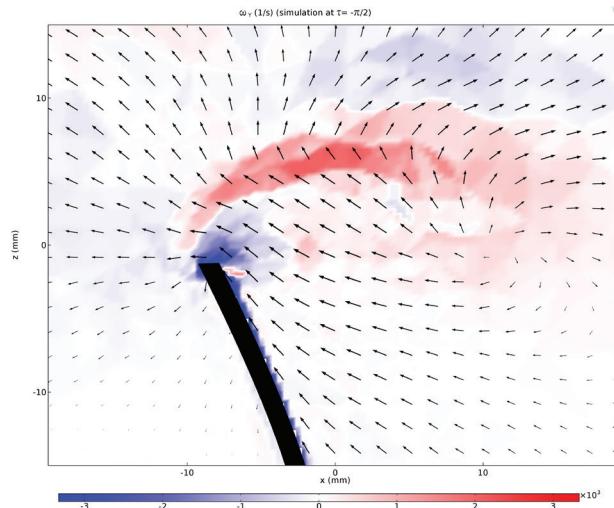
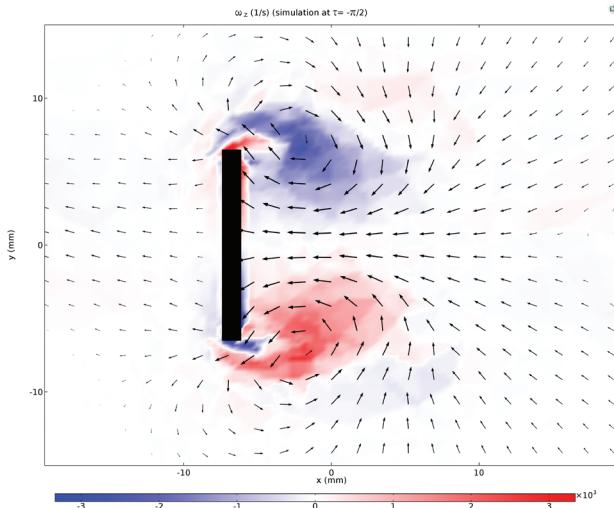


图 3. COMSOL 仿真显示了叶片振动过程中两处位置的涡量和速度场。

固体力学方程，正是求解此类问题的首选方法。

Agarwal 使用 COMSOL 软件对振荡叶片的受力和周围空气的流动执行了三维双向流固耦合分析，以精确捕捉系统内发生的物理现象。受益于 COMSOL 出色的灵活性，Agarwal 能够有选择的简化系统中的某些设计，以便在仿真中对研究的各个方面选用最优方式。

为了简化研究、提高计算效率，工程师重点模拟了风扇在运动中所受的剪切力和流体压力，并没有考虑风扇的压电驱动。模拟结果显示了叶片周围流体的速度、漩涡的结构和运动(图 3)。

“我们通过仿真获取了叶片附近的气流分布，其解析度要高于实验结果。在气流图中，空气流动基本上发生在叶片边缘，故此处的动量最大。在实验中，我们可

以查看测速图像并捕捉运动面，然后将平面拼接在一起，获得漩涡形状。但是实验只能获取一定数量的平面，所以解析度会受到限制。” Agarwal 补充道，“相比之下，如果你选择对此类问题进行全三维模拟，就能研究靠近和远离风扇的气流速度，还能绘制许多不同的变量。”

“软件还可以提取基于用户定义的网格或栅格计算的数据，我们可以将这些数据应用在任何我们想要的地方，比如导入到其他软件，或者使用脚本程序处理数据。” Agarwal 特别提到他如何通过执行后处理操作，他直观地描绘了叶片周围的气流涡量。

» 仿真分析与物理实验：高效组合

诺基亚贝尔实验室的团

队发现，他们的仿真模型可以捕捉系统运行时丰富的细节和动态过程，相比于单一的物理实验方法，仿真能够更加详细地分析叶片周围的气流和运动。该项研究中模型的准确性得到了实验的验证，研究团队期望将其作为基准模型用于后续设计。此项研究成果也可以应用于其他领域，无人机的设计便是

其中一例。“COMSOL 帮助我们大幅提升了全新几何模型的构建效率，加快对设计的优化。我可以自由地修改设计，并从中选出最佳的设计方案。” Agarwal 总结道。在后续的研究中，他们将对多个振动叶片周围的气流和流体动力学进行分析，并以此探索多台风扇同时工作时的散热效果。☺



从左至右依次为：Nicholas Jeffers, Kevin Nolan, Diarmuid O'Connell, 和 Akshat Agarwal。

分析大型强子对撞机的超导磁体失超

借助多物理场仿真，欧洲核子研究中心深入理解了大型强子对撞机中超导磁体和磁路的瞬态效应。

作者 SARAH FIELDS & LEXI CARVER

欧洲核子研究中心（European Organization for Nuclear Research，简称 CERN）位于瑞士日内瓦附近，该机构的物理学家和工程师们希望通过一系列实验来解答粒子物理学的基本问题，揭示宇宙的起源和本质。

在大型强子对撞机（Large Hadron Collider，简称 LHC）的内部，有一条埋于地下的环形粒子加速器，该加速器的范围横跨法国和瑞士边境（图 1），总长度约为 27 公里。在加速器中两束粒子流以接近光速的速度沿相反方向运动，并最终碰撞。实验中高能碰撞的结果有助于人类加深对力和物质最基本构成的认知。

大型强子对撞机中的粒子在强场偶极磁体（工作电流高达 12 kA，磁场强度接近 8.33 T）的驱动下保持圆周运行轨迹。将磁体（图 2）冷却至 1.9 K（低于外太空温度）时，磁体电缆（图 3）能够保持超导状态。理论上，电流在超低温下可以无电阻损耗地在磁体线圈中持续流动。但是在实际运行中，

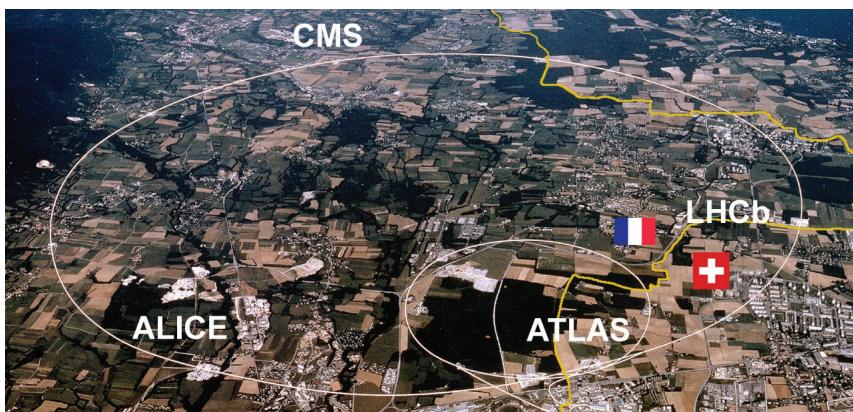


图 1. 地图展示了横跨法国和瑞士边境的大型强子对撞机隧道的位置。

部分磁体线圈有时会恢复到有电阻的状态。

这一现象可能源于下列几种原因：由机械运动交流损耗，或是环形运动的高能质子束所造成的损耗引起的局部温度升高。如果粒子偏离理想轨迹，然后撞击加速器四周的装置（例如磁体），那么高能质子束将沿机器圆周持续产生损耗。如果由撞击产生的能量沉积过大，就会导致局部线圈材料突然从超导状态恢复为正常导电状态，此现象称为失超。材料是否处于超导态可以用“临界面”来判断，取决于超导体所处的临界温度、电流密度和磁场（图 4）。上述任一参数超过“临界面”，超导体就会从超导状态变成有电阻状态，发生所谓的失超。

发生失超后，若不采取保护措施，电阻状态将导致储存在电磁线圈有限体积内的电磁能全部耗散掉。单个 LHC 偶极磁体储存了约 7 百万焦耳的能量，足以熔化超过 10 千克的铜。兆瓦级的能量可能耗散在线圈中，从而产生巨大的热量梯度。值得注意的是，储存在 1232 个 LHC 主偶极中的总能量高达 90 亿焦耳，相当于 1.5 吨



图 2. 主偶极孔的细节图。奥氏体钢轴环将超导线圈固定原位，可抵消额定场中每四分之一线圈 2 MN/m 的电磁力。

炸药中储存的能量。如果在额定能量下不幸发生失超且没有任何保护，强场加速器的磁体极有可能发生难以修复的损坏。更换报废磁体需要耗费长达数月的时间，由于期间粒子束无法工作，会严重影响加速器的正常使用。

Lorenzo Bortot 是 CERN 的电气工程师和研究员，从事超导磁体二维有限元电热模型的开发工作。他开发出了一种时域研究方法，可以对自动失超响应系统的最新技术方案进行性能评估。

» 失超检测

磁体在正常工作时处于稳定状态，产生的磁场（图 5）能引导粒子通

过大型粒子对撞机。由于线圈为超导材料，所以实际测得的磁体电压降等于零，几乎观察不到焦耳损耗。专用的电子系统可以监控磁体，实现对线圈中或相邻磁体间突然出现的电压降的快速响应。一旦信号超过给定电压阈值的时间长于最短有效时间，失超检测系统将立即启动保护预案。

保护系统不仅要具备合理的设计，适配于受监控的磁体，同时系统的电子装置还必须经过正确的配置与优化。一方面，检测系统必须具有足够的敏感性，不漏过任何一次失超事故的发生；另一方面，采用过于严格的标准可能会触发错误的警报。两种情况都有可能中断 LHC 的运行，造成长达数小时的故障停机，影响正常使用。

» 失超预防

磁体失超保护系统的原理十分简明有效：将失超扩展到整个磁体上，以此来最大限度地增加能够耗散能量的体积，避免储存的能量被一小块磁体全部吸收。

Bortot 解释说：“加热磁体的目的是扩大传导区域，使磁体储存的能量耗散到整个线圈中。这个方法乍看有悖直觉：常识告诉我们，当磁铁在正常工作时，应当尽量低温以维持超导态；然而，若单点发生故障，我们便需要尽快让整个磁体升温。温度均衡是关键。”

近来，CERN 开发了一种新颖的失超保护技术，极具应用前景。该技术被称为“耦合损耗诱导失超”（Coupling-Loss Induced Quench，简称 CLIQ）系统，其主要部件是与磁体线圈并联的带电电容组。该系统启动后可引入 LC 谐振，迫使磁体内的磁场发生振荡。

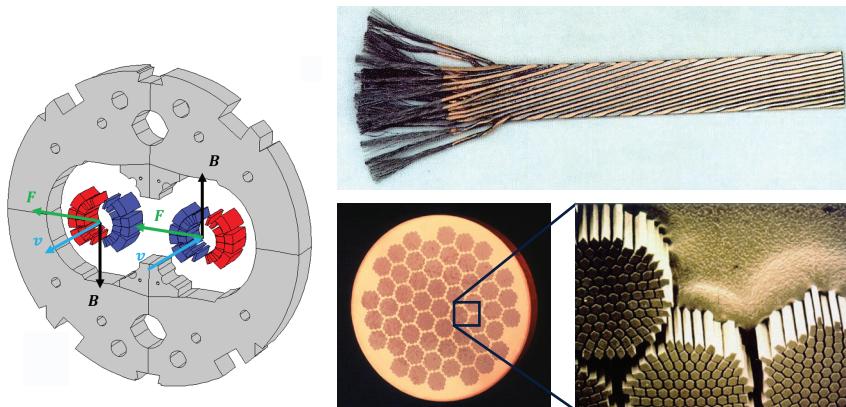


图 3. 左图：大型强子对撞机中主偶极的横截面。红色和蓝色域表示使粒子始终保持圆形轨迹的超导线圈，灰色域表示铁轭。右图：大型强子对撞机中强电流超导磁体的基础元件是由嵌入铜基体的微导电丝制成的电缆。

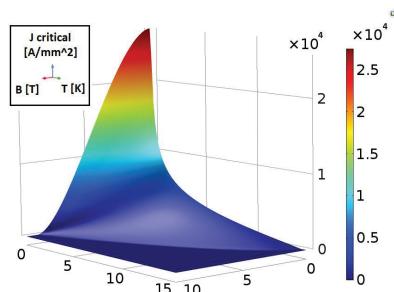


图 4. 磁体中 Nb-Ti 超导材料的临界面。

振荡磁场会在电缆（包括导电丝结构）中引起耦合电流和涡流。线圈会以一种极均匀的方式从内部开始升温，其升温过程类似于微波加热。CLIQ 系统拥有双重功能：最大限度地增加产生感应涡流的磁体体积，同时尽可能缩短超导电缆超过临界温度转变为正常状态所需的时间。在此过程中，能量耗散主要以焦耳热的形式发生。几乎整段线圈都会产生焦耳热，而非集中在单块区域，这保证了失超区域和电阻热能够尽可能均匀地扩散。

» 计算过程中的挑战

通过使用一系列商用仿真工

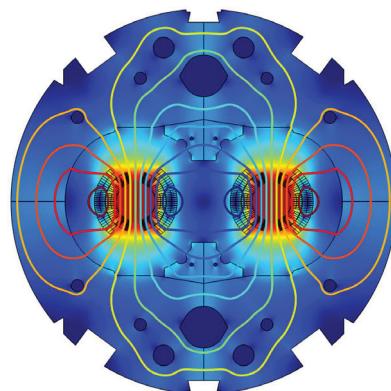


图 5. 模型显示了超导态下施加额定电流的磁体磁场。

具，CERN 的电气工程师团队模拟了加速器磁路中的瞬态效应，并据此开发了一个模块式框架。Bortot 精通 COMSOL Multiphysics® 软件和 Java® 代码，他创建了描述失超传播的电动力学和热量变化的数值模型。计算过程中的挑战需要依赖灵活的工具和精细的设置才能解决。

LHC 的偶极磁体横截面包含数百个子域，每个子域代表半匝绕组电缆，它们共同构成整个线圈（图 6 上）。这些半匝线圈不会全部同时失超，局部的

失超会沿横截面传播和扩散,其过程复杂、难以模拟。“解决此问题的关键是找到一种能以一致的方式对热和电动力学进行耦合的方法。”Bortot 解释说,“为了准确计算上述过程,使每半匝磁

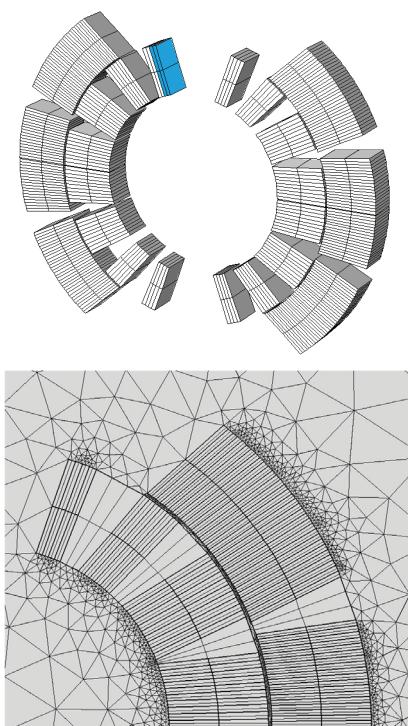


图 6. 上图:磁体的截面几何。下图:磁体截面的有限元模型网格。

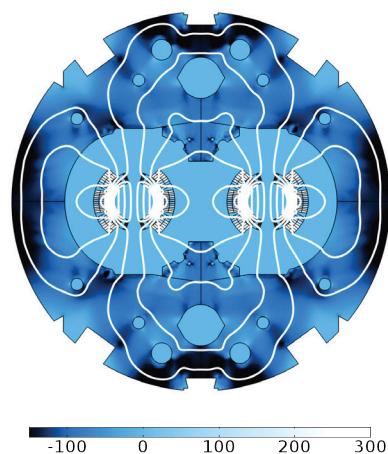


图 7. 涡流以 100 A/s 的速度线性上升至 8 kA 时的等效磁化强度。

体线圈能独立于其他线圈发生失超,每个子域都需要使用专门的方程组。”

要描述失超的电动力学和热变化,研究人员必须在两种尺度下对线圈行为进行模拟,即米(磁体的横截面尺寸)和微米(电缆内导电丝的横截面尺寸)。另外,失超只在几微秒内产生,然后以毫秒为单位进行传播,而磁体完全放电可能要经过 1 秒。也就是说,研究团队需要同时研究三个不同的时间尺度。

“这本质上是一个多物理场、多尺度和多重速率的问题,相互依赖的现象会在不同空间和时间尺度上各自变化发展。”Bortot 解释道。

绝大多数仿真软件不具备创建该模型所需的高效计算能力。使用此类软件时,网格需要跨越六个数量级,求解器时间步长只能采用最小的时间尺度,这会产生大量额外的数据,浪费时间进行不必要的计算。

为了解决这个问题,CERN 的研究团队在 COMSOL® 软件中引入了描述等效磁化强度的表达式对系统进行分析(图 7)。他们没有解析超导电缆中耦合电流的微米级路径,而是利用电流对磁场产生的等效影响来模拟这类寄生电流。Bortot 解释道:“我们以时间常数为系数建立了一个公式,并规定等效磁化强度与场的导数成比例。该公式结合了 Faraday-Neumann-Lenz 和 Ampère-Maxwell 定律。这种做法的前提是已知耦合电流在电缆中占用的路径,这样才能使用等效时间常数进行

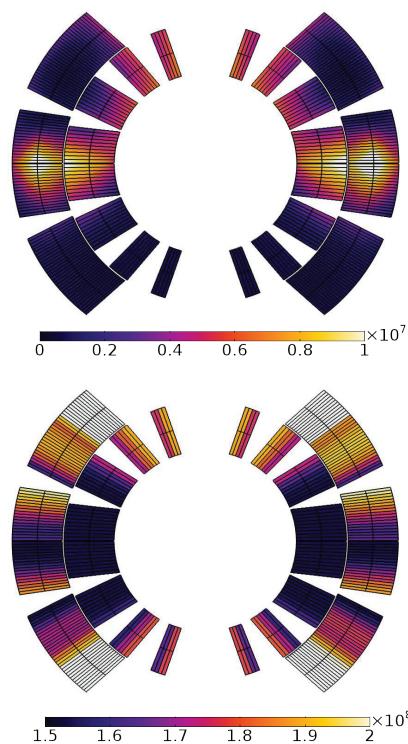


图 8. 线圈中不同的损耗机制,单位为 W/m^3 。上图: CLIQ 产生的感应涡流损耗。下图: 由于失超扩散产生的欧姆损耗。

关联。”

COMSOL 软件的灵活性同样令人瞩目。Bortot 可以编辑标准的麦克斯韦方程组并修改变量。“COMSOL 软件支持编辑待求解的方程,我可以根据需要修改标准的磁矢势公式。另外,因为需要对磁场进行时间求导,我们须要能够访问上一个时间步长的解。

“因为我们已经考虑了等效磁化强度的耦合电流,所以不希望有任何其他已经包含在系统中的电流环流。通过禁止线圈域产生感应电流,我们

“ COMSOL 软件支持编辑待求解的方程,我可以根据需要修改标准的磁矢势公式。”

— LORENZO BORTOT, CERN 电气工程师

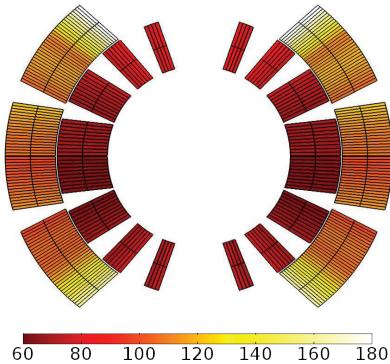


图 9. 失超发生 500 ms 后的线圈温度分布 (K)。

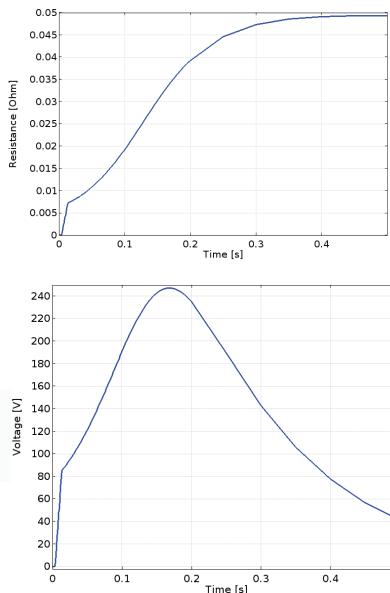


图 10. COMSOL® 软件模型对失超过程的模拟结果。上图:线圈中电阻的增加。下图:线圈终端提取的电压信号。

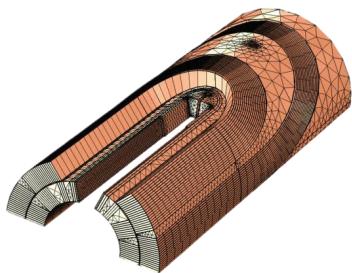


图 11. 三维模型几何和网格的未来方案。

减少了大量工作。可以说，这是整个架构的基石。”这种以间接方式模拟耦合电流的方法也有利于大幅简化网格（图 6 下）。

除了需要用一致的方式模拟系统物理场，研究人员还要面对由模型构建带来的难题。在低温下，高度非线性的材料属性会使数值表达式极为复杂。为了以高效的方式构建并控制数值表达式，研究人员调用了储存在共享公用库中的外部 C 语言函数。除此之外，每半匝线圈均需要使用一组相关变量和算子来表征，其中，线圈的微米级绝缘涂层也需要考虑在内。绝缘涂层对于准确捕捉失超的传播至关重要，为此，研究人员使用了软件自带的内置薄层功能避免了对薄层进行网格剖分降低了模型的复杂程度。

重复的子单元可由软件自动装配，这不仅节省了时间，同时还减少了出现人为误差的可能性。鉴于这一原因，研究人员使用 COMSOL 提供的应用程序编程接口 (API)，用 Java 程序生成了有限元模型中磁体的横截面，可将用户输入转换成分布式模型。这一方式确保了有限元法能够灵活地适应不同类型的磁体。

通过在模拟中使用等效磁化强度替代耦合电流，研究人员可以立即计算出损耗，并得到损耗与磁场变化的函数表达式。由此他们得出结论：磁场变化直接以等效耦合电流损耗的形式耗散。

该团队取得的主要成果之一是创建了大型强子对撞机中主要偶极的失超行为仿真。仿真假设 CLIQ 保护系统可以迅速启动，以减轻失超后果。仿真分析考虑了随温度和磁场变化的非线性材料属性，研究了超导磁体中的磁场振荡及其产生的感应涡流和耦合电流损耗（图 8 上）；失超扩散及其

产生的电阻热（图 8 下）；以及由线圈中沉积的热损耗导致的最终温度分布（图 9）。另外，通过求解热平衡方程，研究人员对 CLIQ 组件的设计进行了交叉检查以确保得到正确的温度，从而能够在整个磁体中扩散失超，保证向线圈输入适当大小的功率。此外，模型还支持提取与失超相关的集总参数，例如随时间变化的线圈电阻和电压（图 10），在后续研究中，集总参数可用作模拟磁体外部电路网络的电路模型输入。

» 从 LHC 到未来的粒子加速器

Bortot 的仿真结果表明，重现突发能量耗散所涉及的相互耦合的物理现象是可以实现的，它为深入研究磁体失超问题提供了合适的分析工具。

现在，研究人员将模型扩展到了正在设计和建造的磁体，为建造大型强子对撞机的高亮度升级版和下一代加速器——未来环形对撞机做准备。他们还会探究将模型扩展到三维域的可行性（图 11）。在设计进程中，这些模型会一直为开发未来的失超检测和保护系统提供有力的支持和帮助。团队作出的出色贡献让当下和未来的加速器都免于承受失超造成的后果，研究人员也能继续研究物质的本质，而不必担心超导磁体发生损坏。☺



从左到右依次为：Lorenzo Bortot、Michal Maciejewski 和 Marco Prioli。

电动汽车的新型电动机设计

法拉第未来公司为电动汽车设计专用的电动机。

作者 GEMMA CHURCH

电动汽车从小众变成了主流，推动着汽车工业发生巨大变革。

然而，改进电动汽车的电动机设计仍然面临重重挑战。一种可能的解决方案是采用功率磁性器件（power magnetic device，简称 PMD），这类器件包括电动机、发电机、变压器和电感器。简而言之，它们能利用电磁场将电能转换为机械能，或者进行逆向转换。

在电力工程领域，尤其是对于 PMD 的设计而言，现代技术的发展始终以减少系统损耗、重量、体积和成本为目标导向，同时致力于提高功率容量、可靠性，以及大规模量产能力。

» 将模拟、优化、协作合为一体

企业若想在现代产品竞争中保持领先地位，须采用先进的方法来优化各类 PMD（例如电动机）的设计。其中的一种方法是将设备的高效计算模型与最尖端的优化技术相结合。此外，电动机设计的瓶颈从原理上来说，是一个涉及了力学、电气和热力学的复杂多物理场问题。

法拉第未来（Faraday Future）是一家专注于智能电动车开发的新兴技术公司。他们正在使用专业的多物理场有限元分析工具——COMSOL Multiphysics® 软件设计及制造具有高功率密度的先进电动机。

法拉第未来公司采取了创新的模块化策略来推进电动汽车的设计。该公司电磁领域的首席工程师 Omar Laldin 解释说：“我们公司正在设计可供一系列车型使用的电动机。这种电动机首先需要能适用于我们的可调节平台架构，这样就可以使汽车动力总成实现模块化开发。我们可以在此架构中

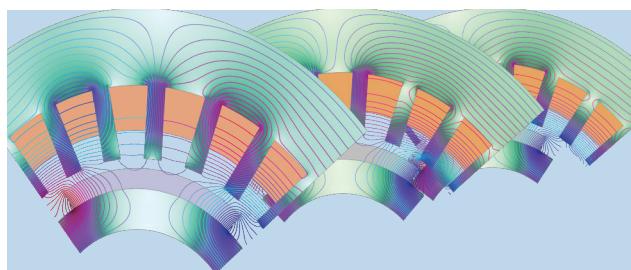


图 1. 非线性的表面式永磁同步电动机 (surface permanent magnet synchronous motor, 简称 PMSM) 的有限元分析 (FEA)。

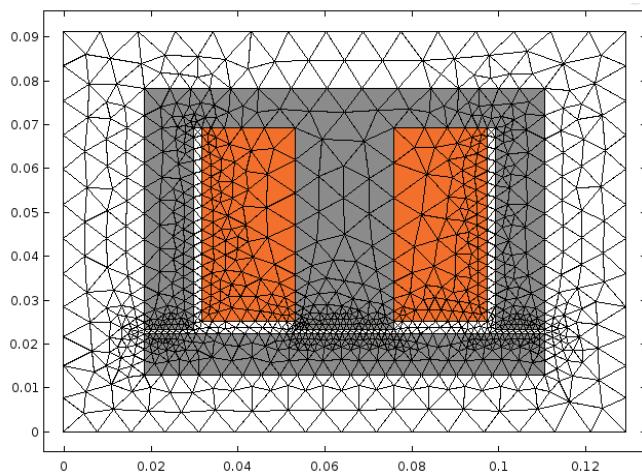


图 2. EI 芯执行器的网格。

添加或移除电动机、调整电池数量和底盘尺寸。”

“为了实现这一点，电动机设计不能只考虑电磁元件方面的问题，还必须考虑到各种工作条件，例如力学、热性能等多方面因素。” Laldin 补充说。图 1 展示了设计小组完成的电磁分析示例。

这涉及了一系列高级优化算法，用于快速模拟每项设计的性能。计算速度至关重要，这是因为优化算法须执行大量迭代来保证不同的设计经过全面的检验。为

此，模型的某些方面需要进行简化。

Laldin 解释道：“在预测热性能时，运行一次完整的 CFD 分析有可能耗时数周。我们常常面对多达数千种设计方案，每个设计方案都有几百个操作要点，所以要进行详细的多物理场分析，计算效率低的工具根本无法胜任。COMSOL® 软件这样的工具可以帮助我们执行全面周密的电磁分析、力学分析以及简化的热分析。它不仅运行稳定，而且在设计进程中能够即时提供各个方面的

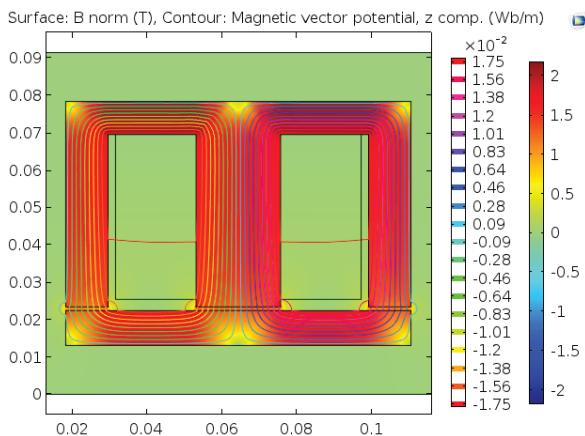
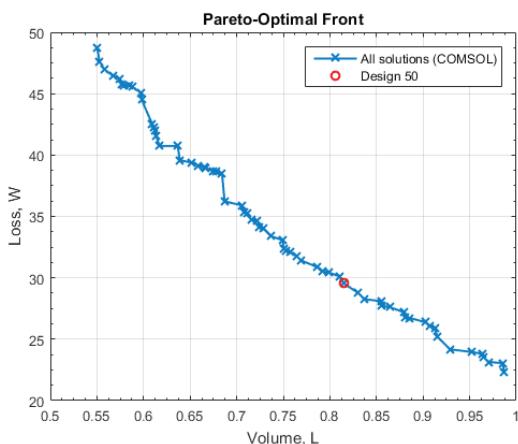


图 3. 左图: Pareto 最优解给出了质量与损耗之间的折衷方案。右图: EI 芯执行器中的磁通分布。

反馈。”

在功能全面的 COMSOL 软件的帮助下，法拉第未来的电磁电动机设计团队能够与其他团队紧密配合，其中包括电动机机械、逆变器、电动机控制、动力总成控制、系统工程等团队，他们共同组成了动力总成团队。

“在把数据发送给其他团队之前，我们会预先完成所有的前期分析，保证数据基本正确。这让我们大幅减少了与其他团队合作需要执行的迭代次数。我认为这是 COMSOL 软件最突出的优势。”他补充说。

» 设计执行器

EM (electromagnetic motor, 电磁马达) 团队专门设计了一个 EI 芯执行器来满足特定的限制要求，他们力求在缩小体积和降低功率损耗这两个矛盾的目标之间找到平衡点。功率损耗必须要尽量降低，但设计人员不希望因此增加组件的尺寸，封装尺寸也是大多数车辆系统中的关键指标。执行器由缠绕在固定 E 型磁芯上的导线线圈以及可移动的 I 型磁芯构成 (图 2)。

他们在 COMSOL® 中执行了二维电磁场分析，并耦合了

“ 我们从事前沿技术开发, 并且崇尚速度和效率, 因此 COMSOL 是我们的必然选择。

— OMAR LALDIN, 法拉第未来电磁领域的首席工程师

在 MATLAB® 软件中建立的遗传算法。该模型将不同种类钢材的高度非线性特性纳入了考虑范畴，而遗传算法则提供了全局优化和多目标的 Pareto 最优解，实现了缩减体积和降低功耗之间的平衡 (图 3)。

他们使用了执行器的几何参数作为算法的输入，并根据线圈电阻计算出损耗。通过此方法，他们对可产生 2500 牛顿力的电磁执行器的各类设计进行了快速分析。

» 探究损耗

研究团队分析了电动机所有钢材的非线性特征，此特征会改变槽内高频导体损耗的性质。当电动机高速运转时，导体的趋肤和邻近效应不断增强，损耗会随之增加。同时，损耗也会受温度的影响。另外，电动机的几何形状可能导致部分绕组结

构及其导体相对更容易冷却。举例来说，导体的间距和尺寸可以影响槽内的传热状况。

Laldin 和同事进一步执行了更深入的多物理场分析：他们耦合了电磁元件与热性能，借此识别电动机中可能导致灾难性故障的局部热点。他们发现导体内的电流密度会随着槽内通量密度的变化而大幅变化。他们计算了每个导体内的损耗密度，然后获得了温度分布，从温度分布可以看出电动机中不同区域的最高温度 (图 4)。

Laldin 说：“即使电流相同，损耗也会因导体的不同而产生差异。我们在 COMSOL 中模拟了这些变化，对其进行了一些近似的快速热分析，用于研究温度的分布。

通过识别局部最高温

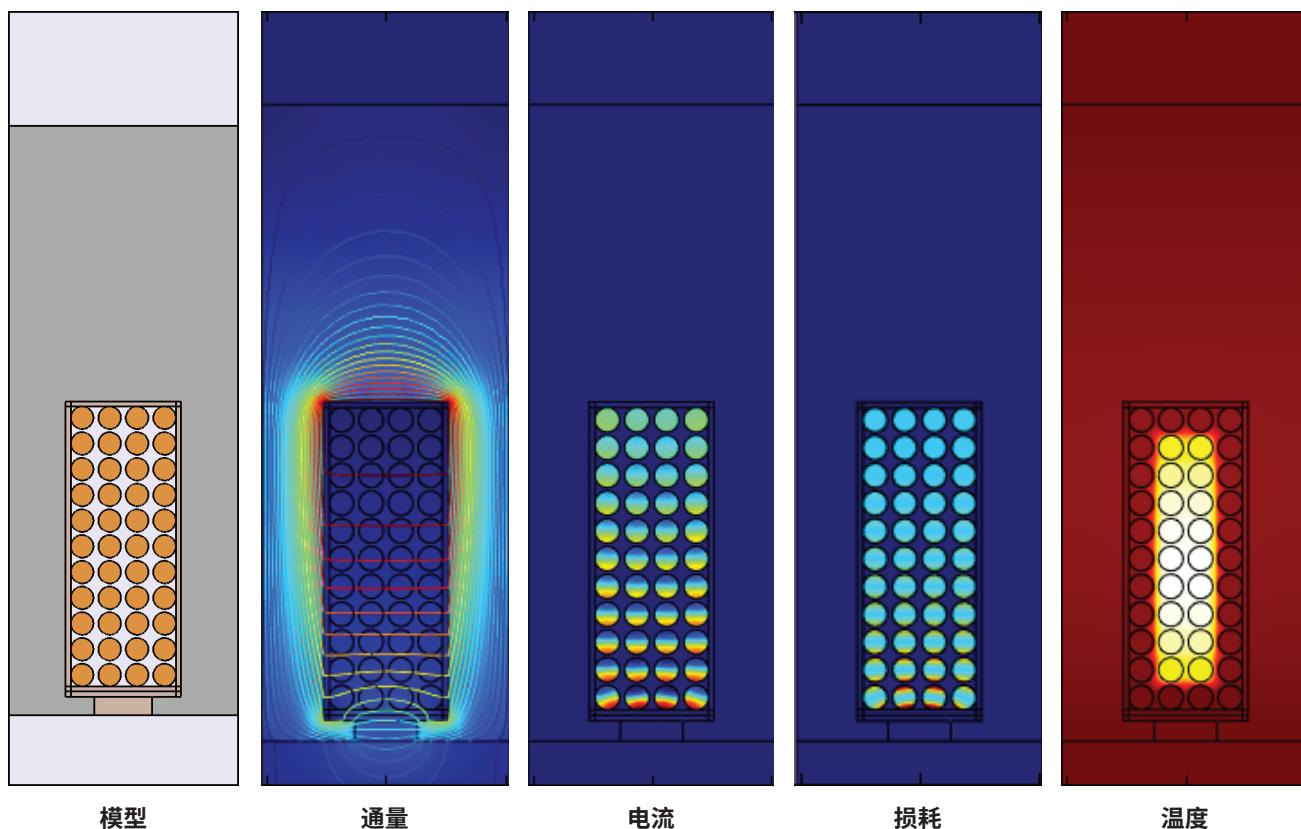


图 4. 从左到右: 定子槽模型中的模型几何形状、磁通量、电流密度、功率损耗和温度分布。

度，制造商可以判断设计的可靠性，预防具有破坏性的电动机故障。

这种多物理场分析方法让法拉第未来的工作人员能够兼顾电动机及其组件的设计和分析工作，节省了大量的研发时间。Laldin 说：“借助 COMSOL，我们无需再像以前那样与不同的团队一起进行十余次的迭代设计，现在仅需 1~2 次便可以完成整个设计。减少在不同部门之间的迭代次数是使用多物理场分析工具的优势之一。先由一个人进行优化设计，再由不同团队进行细微改进，其效率远高于每个团队都独立地分析物理场的各个方面。”

» 仿真 App 交互未来

法拉第未来虽然是一家年轻的公司，但它已经在电动汽车行业取得了斐然的成绩。他们在两年的时间里设计、开发并制造了首辆电动汽车。他们还加入了 COMSOL 的“案例交流”在线社区，在这里用户可以上传并分享他们的模型，并与其他用户讨论技术和研究发现，以此推动自身发

展。Laldin 说：“成就这样的创新，借助我们供应商的能力是唯一切实可行的方法。在用户社区中，我们能够更加方便快捷地找到各领域问题的解决方案。”

Laldin 补充道，“我们从事前沿技术开发，并且崇尚速度和效率，因此 COMSOL 是我们的必然选择。举例来说，如果我们需要在软件中实现一项新的功能，COMSOL 公司会立即响应我们的需求，并在下一个版本中加入该项功能。”

富有活力、开放包容

的“案例交流”论坛能够帮助法拉第未来保持市场的领先地位，Laldin 继续说道，“最重要的是，在线社区与创业精神十分契合，因为在这里，你会非常愿意分享非机密的数据和专业知识，所有参与交流的人都能从中受益。我一直认为，在用户社区进行知识交流的过程中，收获永远多于付出，尤其是当你能够得到顶尖工业合作伙伴的指导意见的时候。这种交流合作的方式对于我们这样的创业公司而言大有裨益。”

隐形连接器开启未来 5G 时代

Signal Microwave 公司使用仿真技术设计高速射频装置的专用连接器。

作者 SARAH FIELDS

随着移动通信用户数量的迅速增加，市场对高速通信的需求也日益增长。相关企业和行业团体正在夜以继日地奋战，全力应对这一挑战。5G 网络的速度预期将比 4G LTE 快 100 倍，宽带连接速度可提高 10 倍。“我们需要解决很多问题，才能将 5G 技术从概念转化到实际应用中。” Signal Microwave 公司的联合创始人 Bill Rosas 表示，“我们的首要任务是要能整体实现 5G 技术，同时必须解决从网络测试到更新系统互联的各项技术。”

对于连接器而言，即便是微小的技术细节，也值得研发人员投入大量的精力进行研究。这些不可替代的机电组件的作用是连接电气终端，保证终端能正常地将电磁能量通过一条传输线传到另一个组件，实现数据的传输或解析。所有电子设备和系统都离不开连接器，其精度对于传输信息的电路而言至关重要，尤其是在数据传输速率不断提升的今天，连接器的重要性更是不言而喻。

Eric Gebhard 和 Bill Rosas 共同创立了 Signal Microwave 公司，其核心业务是为信号完整性分析领域提供定制的连接器和。Signal Microwave 有能力持续提升电路的数据传输速率，满足优化射频、微波和毫米波连接器的需求，为未来 5G 的发展奠定坚实的基础。

» 频率增加带来的复杂性

从事射频（radiofrequency，简称 RF）连接器设计的专业人员面临着一系列的难题。他们一方面要考虑几何形状、尺寸和传输的限制要求，另一方面还要保证连接器与传输线的阻抗相互匹配。Rosas 表示：“5G 应用的组件制造商在供货速度方面无可挑剔，开发和提供高性能组件的能力是在市场竞争中取胜的关键。”

当频率增高时，几何结构或材料选择造成的微小失真会

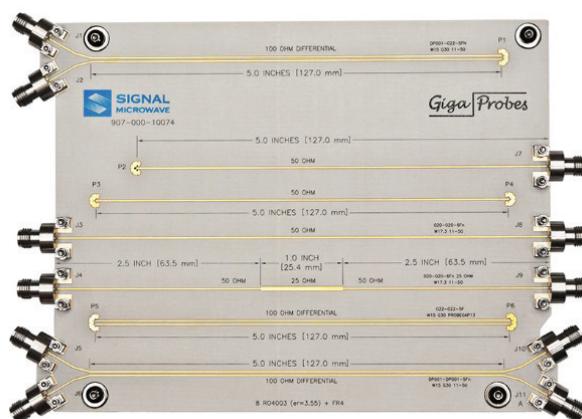
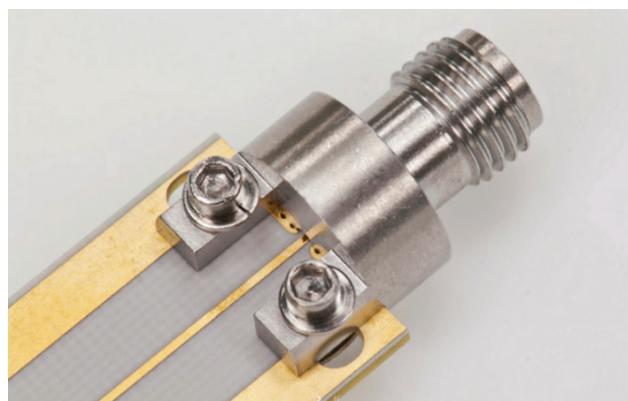


图 1. 发射转换器的特写图(上)；由 5G 系统工程师制作的测试电路板(下)。

被放大，致使保证阻抗匹配的难度增大。图 1 的照片显示了专为开发中的 5G 通信应用而设计的射频连接器。

仿真可以帮助设计人员进行深度优化，Gebhard 和 Rosas 对具体的实现方式表现出了浓厚的兴趣。Signal

Microwave 拥有广泛的客户群，其中一部分工程师客户专为通信领域、商业和军事应用开发频率为 40~110 GHz 的高频装置。

» 设计射频连接器

多物理场仿真让 Eric 和他的团队能够快速地对每一位新客户提出的设

“开发和提供高性能组件的能力是在市场竞争中取胜的关键。”

— BILL ROSAS, SIGNAL MICROWAVE 公司联合创始人之一

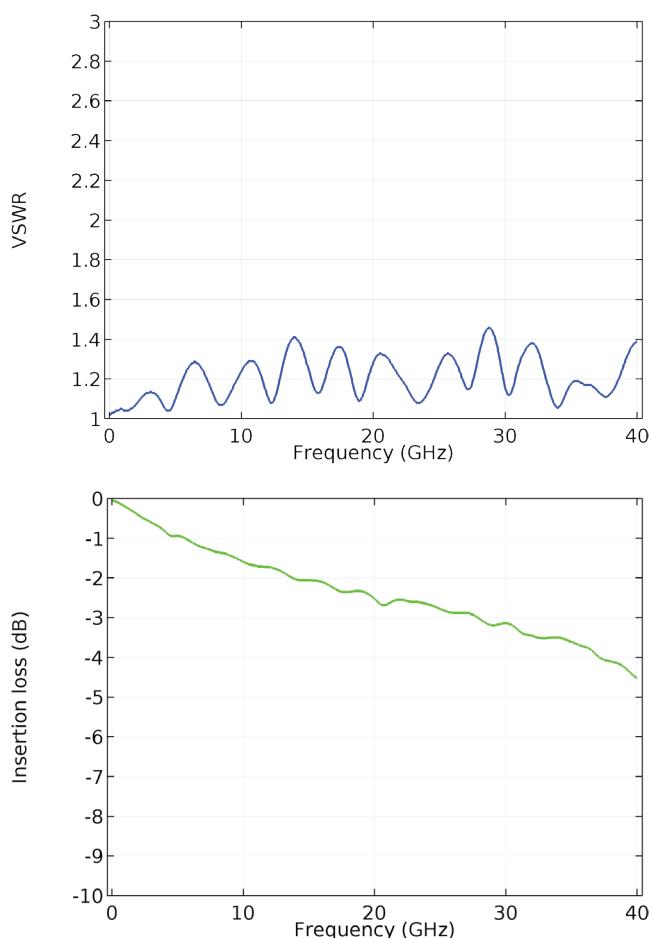


图2. Signal Microwave 部件中测试电路板的电压驻波比 (VSWR) 测量值(上)和插入损耗(以 dB 为单位的 S21 参数的值,参考下图)。

计挑战。Gebhard 表示：“COMSOL 软件可与多种设计工具进行交互使用，这一功能可以让我们的团队高效地开发并优化连接器，满足不同行业客户的个性化要求。”这种方式缩短了产品的上市时间、减少了总体开发成本，并降低了对投资的需求。另外，由于组件设计人员无需考虑连接组件安全性方面的问题，这让他们可以放心地将全部精力投入到

其他关键环节。

简单来说，设计人员需要将电连接器的机械部件转换为传输线。在设计射频连接器时，首要设计目标是制造出可实现“电隐形”的组件，即通过使连接器与传输线的其余部份保持基本相近的性能，尽可能地减少电阻和能量损耗。Gebhard 说：

“阻抗不匹配会引起回波损耗，导致信号失真或衰减，我们希望最大限度地减少这

一问题。”借助仿真分析，设计人员在进行制造和测试前，就可以完成对产品的优化。

» 通过仿真寻找完美的连接器

通常情况下，Signal Microwave 的客户会要求提交单件连接器的具体几何参数，并预先确定阻抗值，然后他们会据此进行剩余的设计工作。Gebhard 和 Rosas 采用了一种整体分析方法来设计连接器，并在设计之前预先加入电路板和设备的总体要求。该团队通常会先在 Solid Edge® 软件中构建几何体，再将几何导入 COMSOL Multiphysics®，然后使用软件中的 RF 建模功能来分析和优化设计。

Gebhard 对测得的电压驻波比 (voltage standing wave ratio)、回波损耗和插入损耗，以及由阻抗不匹配或意外的不连续性导致的功率损耗进行了仿真分析，这些参数都应降至最小。举例来说，Signal Microwave 组件

中测试电路板的电压驻波比测量值小于 1.5:1，与仿真结果一致，说明了反射功率和回波损耗足够低 (图 2 上)。根据仿真结果，该团队判断插入损耗较为平缓，损耗随着频率的增高而逐渐增加 (图 2 下)。借助多物理场仿真，Signal Microwave 的团队建立了反射功率最小的无焊接边缘连接器组合，这一组合可以拓展到毫米波的范围。

» 边缘启动连接器

Gebhard 同时还模拟了两个边缘启动连接器，连接器利用 50 欧姆的同轴集总端口进行激励和终止。在这个案例中，接地共面波导 (grounded coplanar waveguide) 电路板在 8 密耳 (mil，容量单位) 的基材上完成制作，基材的介电常数为 3.55。金属过孔将共面波导的一对接地平面连接到底部的接地平面 (图 3)。

Gebhard 解释说：“为了成功实现连接器的‘电隐身’，我们采取的方法是通

“我们的首要任务是要能整体实现 5G 技术，同时必须解决从网络测试到更新系统互联的各项技术。”

— BILL ROSAS, SIGNAL MICROWAVE 公司联合创始人

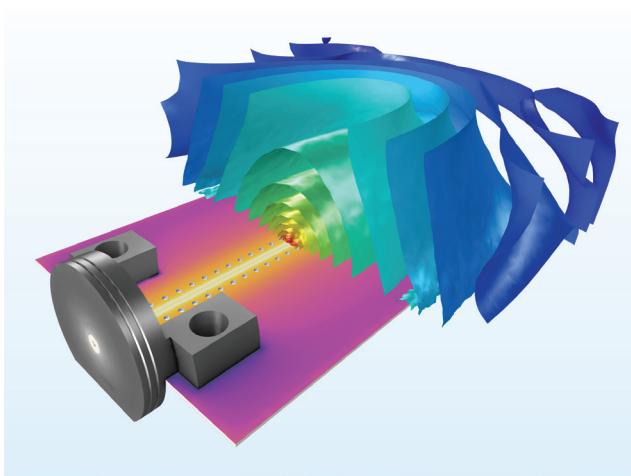
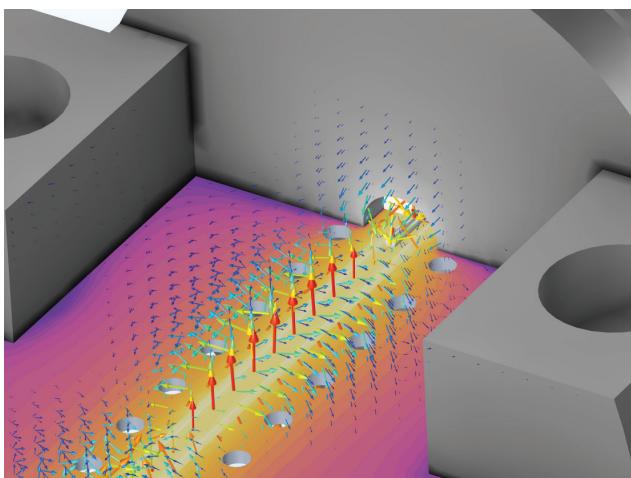
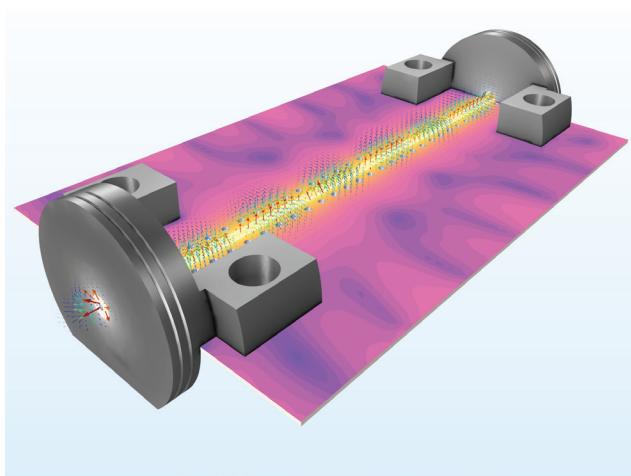


图 3. 结合了 5G 和卫星通信技术的高速互连应用的测试电路板仿真图像。在 20 GHz 下，电场中以 dB 为单位的模量的云图和箭头图(上)。第一张绘图放大版(中)。在 1 GHz 下，电路板顶部电场中以 dB 为单位的电场模的等值面图(下)。

过仔细检查几何的不连续性来尽量减少反射，在此过程中我们利用了 S 参数来描述回波损耗。”

除了通过修改几何结构来最大程度地降低回波损耗，Gebhard 还可以通过优化介电材料来获得所需的阻抗。在某些情况下，Gebhard 也会使用 COMSOL® 软件来计算结构设计的相关问题，例如拆下连接器主体上的针脚所需要的最小力。

» 从高度匹配到成为现实

Gebhard 同时还开发了频率为 70 GHz 的盲插式连接器，可以适用于自动测试设备。在软件中完成对射频模型的创建后，他制作了物理样机。令人吃惊的是，连接器样机并未按照预期实现正常工作。在对物理原型进行细致的分析后，Gebhard 这才意识到连接器存在一个微小的缺陷。经过工程技术鉴定，Gebhard 回

到原始模型，并将缺陷添加进来。最终，仿真结果与物理测试数据完美匹配。

“虚拟设计正确无误，然而物理样机却出现了我们没有预料到的缺陷。在对样机进行详细的测试后，我们发现了问题的所在，并将缺陷添加到了虚拟模型中。最终，生成的仿真结果与观察到的问题完全一致。对我们来说这真是一个灵光乍现的体验。”

“在这个案例中，我惊喜地看到仿真结果与现实如此高度地吻合。我们随后又在这个射频连接器设计中添加了一些特别的构思，十分期待亲眼看到这些连接器的性能表现。”

高精度的仿真工具让 Gebhard 可以不受约束地设计和制造针对专业射频应用的定制化连接器，不仅减少了对物理样机的需求，同时还有效地缩短了开发周期。◎



从左至右: Bill Rosas 和 Eric Gebhard, Signal Microwave 公司联合创始人。

燃料电池有望在印度取代柴油发电机

印度国家化学实验室的科学家将目光投向了一种低成本的燃料电池，期望能取代印度电信塔目前正在使用的性能不稳定的高污染柴油发电机。

作者 LEXI CARVER

近年来印度的发电和输电能力已得到了显著的改善，但仍有 2.1% 的能源缺口，并且约有 2 万个村庄没有纳入电网覆盖范围。不仅如此，通往城乡的电力供应仍旧不稳定。因此，柴油发电机被大范围地应用于分散式供电。柴油发电机(图 1 上)虽然价格低廉，但普遍效率低下，同时会对周边环境和居民的健康带来潜在危害。

为解决这一难题，印度国家化学实验室 (National Chemistry Laboratory, 简称 NCL) 联合印度科学与工业研究理事会 (Council of Scientific and Industrial Research, 简称 CSIR) 下属的两所实验室——中央电化学研究所 (Central Electrochemical Research Institute, 简称 CECRI) 和国家物理实验室 (National Physical Laboratory, 简称 NPL)，着手研究清洁、高效、可靠的发电技术为电信塔供电，并期望最终能够为建筑物提供能源。

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, 简称 PEM 燃料电池或 PEMFC, 见图 1) 是一种兼顾了成本和污染问题的理想解决方案。如今许多应用中都能看到 PEM 燃料电池的身影，它正逐步替代传统的电力技术。燃料电池的优势明显：碳排放量小、

噪音低、燃料兼容性强，与其他可再生能源解决方案具有良好的互补性，因此适用于交通运输、住宅楼、办公室以及一些工业领域。PEM 燃料电池系统的总转换效率超过 30% (柴油发电机约为 22%~25%)，当使用纯氢气发电时，排放物只有水蒸气。

» PEM 燃料电池的工作原理

PEM 燃料电池中包含一个膜电极组件 (membrane electrode assembly, 简称 MEA)，由气体扩散层、电极和聚合物电解质膜构成。在 MEA 内发生电化学反应，产生电能。

在单个 PEM 燃料电池中，氢气流向组件的阳极，在阳极催化剂的作用下分解为质子和电子。电子在通过电极中的碳纳米颗粒网络传导至另一侧的阴极之前，会先输出电流，为设备提供电能。与此同时，质子穿过质子交换膜到达阴极，空气中的氧气通过 MEA 中的气体扩散层 (gas diffusion layer, 简称 GDL) 到达阴极 (图 2)。

在阴极催化剂的活性位点上，质子与氧气及电子反应生成水；副产物只有水和热量。多个单体电池相互串联，便组成了 PEM 燃料电池堆 (图 3)。

燃料电池的输出功率和效率取决于多种因素，其中包括：阳极和阴极活性层



图 1. 上图：为印度的电信塔供电的柴油发电机。下图：PEM 燃料电池。

的催化活性、电极将气体扩散电极中的液态水输送至外部的能力、碳网络的电导率和孔隙率、反应气体流向催化剂的传输过程、PEM 的质子电导率以及双极板的电导率。

» 寻找最高效的配置

为印度的电信塔选择 PEM 燃料电池的关键在于找到转化效率最高的最优结构。众所周知，对一个设计因素进行优化时，可能会降低另一个因素的效率。举例来说，增加气体扩散层的孔隙率更有利于氢气和空气自由地进入、水分自由地离开，但可能会降低电导率。

由 NCL 项目的首席科学家 Ashish Lele 博士领衔的专业团队针对不同的配置进行了模拟和分析，力求为印度电信塔使用的 PEM 燃料电池寻找最优性能组合。他表示：“我们希望进一步了解碳电极中发生的反应，研究电极中的反应气体和质子的传输过程如何影响总反

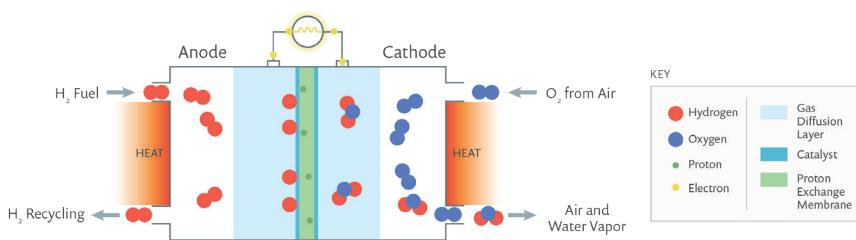


图 2. PEM 燃料电池的概念图。氢气进入阳极，在阳极催化剂的活性位点上发生反应，分解成质子和电子。电子经过有负载的外电路传导到阴极，质子穿过质子交换膜中的电解质迁移到阴极。PEM 由可传导质子但不传导电子的固体聚合物制成。图注：Recycling - 循环；Heat - 热；Fuel - 燃料；Anode - 阳极；Cathode - 阴极；O₂ from Air - 空气中的氧气；Air and Water Vapor - 空气和水蒸汽；Hydrogen - 氢；Oxygen - 氧；Proton - 质子；Electron - 电子；Gas Diffusion Layer - 气体扩散层；Catalyst - 催化剂；Proton Exchange Membrane - 质子交换膜。

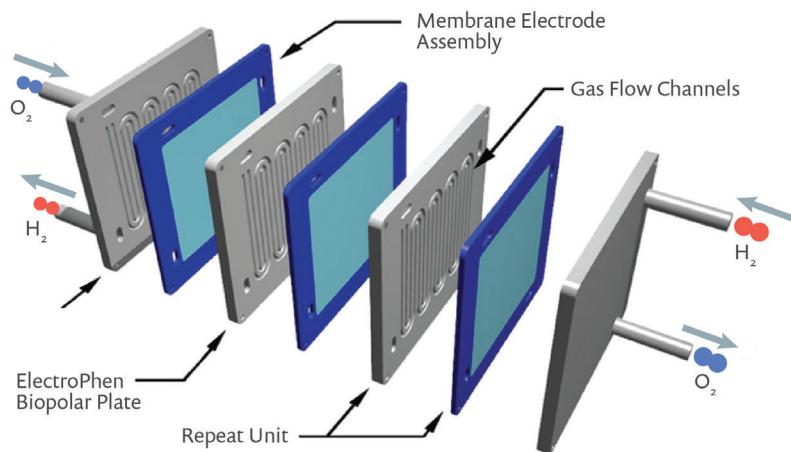


图 3. PEM 燃料电池堆的示例，它包含多层重复单元。图注：ElectroPhen Bipolar Plate - 双极板；Membrane Electrode Assembly - 膜电极组件；Gas Flow Channels - 气体流道；Repeat Unit - 重复单元

应速率。我们的最终目标是了解各类不同参数对 PEM 燃料电池整体性能的影响，这些参数包括工作条件、流场的几何形状和 MEA 结构等。”

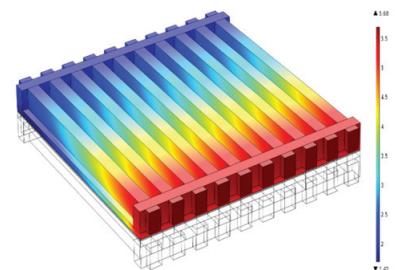
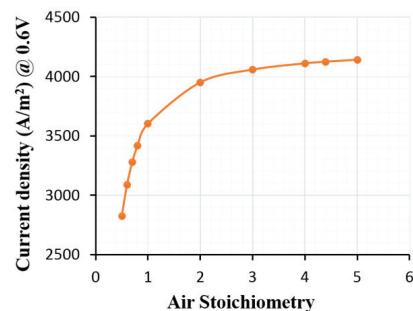
Lele 和他的团队模拟了反应气体的对流、催化剂层中的伴随反应，以及质子在 PEM 燃料电池中的传导过程。在模拟过程中，他们使用了 COMSOL Multiphysics® 软件的化学反应建模和电化学阻抗谱 (EIS) 仿真功能。EIS 方法通过测量阻抗和频率响应来表征电化学系统。下一页中的短文简要介绍了 COMSOL® 软件的 EIS 仿真功能。

“COMSOL 软件出色的功能让我们能同时兼顾质量平衡、动量平衡、物质平衡和电荷平衡。”他解释说，“我们对

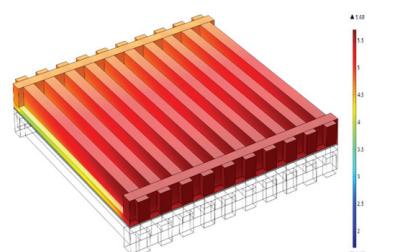
不同参数进行了灵敏度分析，例如流场形状等设计参数、背压和化学当量等操作参数，以及离聚物-碳比等结构参数，从而确定了各个参数对 PEM 燃料电池性能产生的影响。”在 COMSOL 软件的帮助下，他们能够深入理解上述变量对 PEM 燃料电池总功率输出的影响。

图 4 展示了化学当量 (即反应气体的实际流入量和产生给定电量所需的反应气体量之间的比率) 在平行流场条件下带来的影响。

Lele 团队研究了不同的流场类型，随后从中选定了效率最高的流道形状和布局。“我们分析了四种常见的流场类型：平行、蛇形、针状和叉指形。”他解释说，“COMSOL 的分析结果表明，最



Air Stoichiometry = 1



Air Stoichiometry = 5

图 4. 绘图显示了不同空气化学当量对应的燃料电池产生的电流密度。当空气 - 燃料比为 5 时，电流输出不仅更大，而且更加统一。图注：Air Stoichiometry - 空气的化学当量

后一类(叉指形)流场具有特定的优势,更适合应用于高温 PEM 燃料电池。”

通过比较不同流动形状下的电流密度,团队进一步证实了叉指形流场是最佳选择(图 5)。具体来说,叉指形流场中的反应速率较快的原因在于电极和 GDL 中由压力差驱动的对流质量传递,而此类质量传递是其他三种流动类型所不具备的。叉指形流场中的反应速率越快,反应效率就越高,氢气和氧气的消耗量也随之增加。压力曲线(图 5)清晰地显示了两个连续通道间的压降与 GDL 内产生对流之间的关系。

» 迈向绿色燃料之路

通过使用 COMSOL 对 PEM 燃料电池的配置进行分析,研究团队找到了最佳的流动模式、碳纤维层和气体输

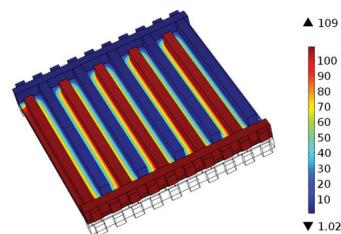
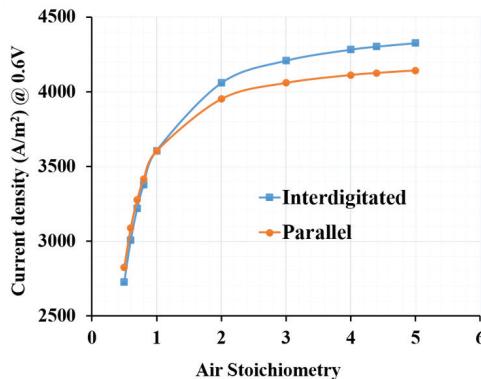


图 5. 左图:比较叉指形流场和平行流场设计中的燃料电池产生的平均电流密度与空气化学当量之间的函数关系。右图:叉指形流场设计中微流道的内部流体压力。

入水平,从而最大限度地提高了功率输出。Lele 总结道:“在 COMSOL 的帮助下,我们研究了所有相关变量对最终输出的影响。在运行了灵敏度分析后,就能够找出关键变量。”

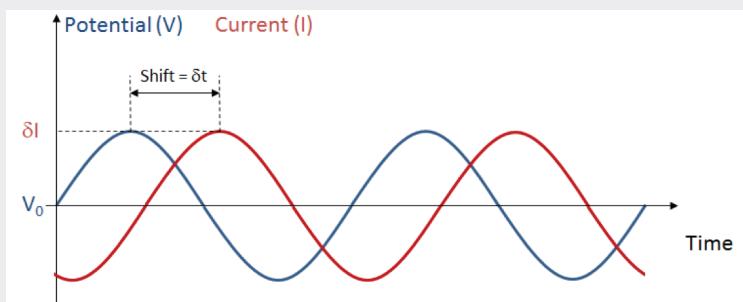
NCL 研究人员的下一步计划是将该

技术进行授权推广,并将 PEM 燃料电池进行大规模量产。他们非常期待能为印度电信塔提供更清洁、更可靠的能源服务。他们希望此项成果能为房屋建筑和交通网络稳定地提供绿色能源,推动整个国家迈向绿色燃料之路。☉

使用 EIS 分析对系统特性进行虚拟研究

作者 ED FONTES

电化学阻抗谱 (Electrochemical Impedance Spectroscopy, 简称 EIS) 的原理非常简单:当系统的平均电压 (V_0) 受到一个随时间变化的正弦扰动时,作为对电压扰动的响应,系统会产生一个相应的正弦电流(参考下图)。



电流响应可能会存在一个时间偏移 (δt),这种偏移是由于某些原因造成的电流对电压正弦扰动的延迟响应。举例来说,在低频下,诸如质量传递之类的缓慢步骤可能会造成偏移,而快速步骤可以紧紧地“跟随”电压扰动。在高频下,缓慢步骤只能“看见”平均电压,但无法响应电压扰动。与之相比,快速的步骤(例如反应动力学)则会引起高频下的响应偏移。此外,响应的振幅 (δI) 也会跟随频率而相

应地变化。

EIS 分析法通过扫描不同的频率,进而分离出具有不同时间常数的步骤。时间偏移和针对电压扰动的电流响应幅度可以通过复数阻抗进行表示,其中阻抗的虚部表示时间偏移,实部表示响应的比例。

阻抗响应有助于深入了解燃料电池的多种特性和反应过程。在高频下,电容、电化学反应和局部电阻等短时过程可以影响阻抗;另一方面,在低频下,孔隙电解质中的扩散等现象会对阻抗产生影响。频率扫描可以在不同的燃料电池极化下进行,由此研究不同负荷下的现象。将 EIS 建模和依靠实验数据的参数估算相结合,人们能够对不同负荷下系统的传递和反应特性进行精准地描述。☉

优化存储芯片的剥离工艺

为满足消费者对小尺寸、大容量存储芯片的需求,工程师通过优化芯片的制造工艺,确保芯片始终具备优异的性能。

作者 LEXI CARVER

上世纪八十年代,在科技发展的浪潮里,一种叫做闪存的计算机存储器脱颖而出,以其可擦除、可编程的特性成为了广受市场追捧的科技产品。如今,此类存储芯片已广泛应用于照相机、存储卡、USB、手机等数码产品中,它可以为我们存储成千上万的照片、音乐和视频文件。

存储芯片在消费者眼中或许并不起眼,但却需要设计者付出不懈的努力,才能满足市场对小尺寸、大容量的需求。每一个存储设备产品背后,都离不开研发人员、工程师、装配人员长时间的付出,他们需要共同克服与微型芯片制造工艺相关的种种挑战。

» 制造完整无缺的裸片

存储芯片的制造工艺流程如下:首先将直径为 300 mm 的半导体晶圆放置在载带上,然后将其分割成多块芯片。载带移除后会在芯片底面留下热塑性胶粘剂,随后通过加热与压缩,胶粘剂将芯片固定在基板上。通过将多层芯片粘结在一起,可增加指定区域的存储量,这些芯片和基板之间通过焊线连接。最后,将整个叠片放入压塑机,封装上保护塑料,然后再分割成许多片,每片都包含一叠存储芯片(图 1)。

如何在移除载带的同时保证轻薄的裸片(die)不弯曲,这是一个相当棘手的问题。几十年前的芯片比现在的厚得多,当时的制造商使用了一种多针顶针,其中安装的一串顶针可以将载带移除。然而对于现今的轻薄裸

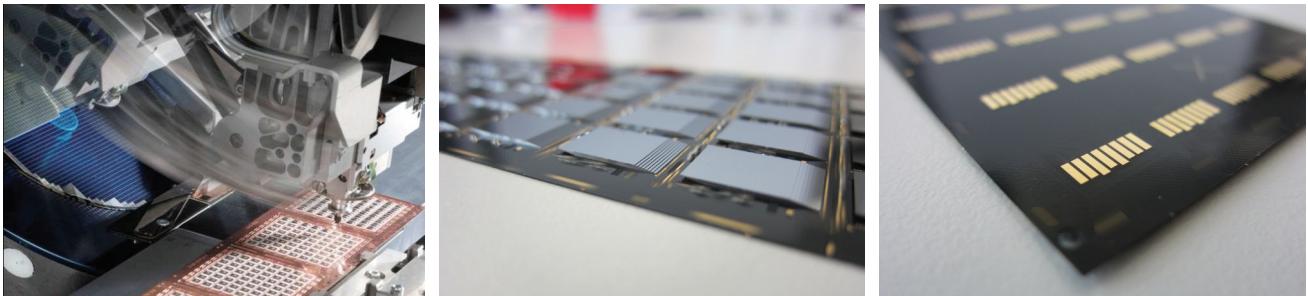


图 1. 左上:在完成金线键合之前,将裸片粘合到基板上,封装上塑料,然后分割芯片。中:在基板上堆叠的裸片。右:基板背面显示了存储芯片与更大的器件之间的连接接口。

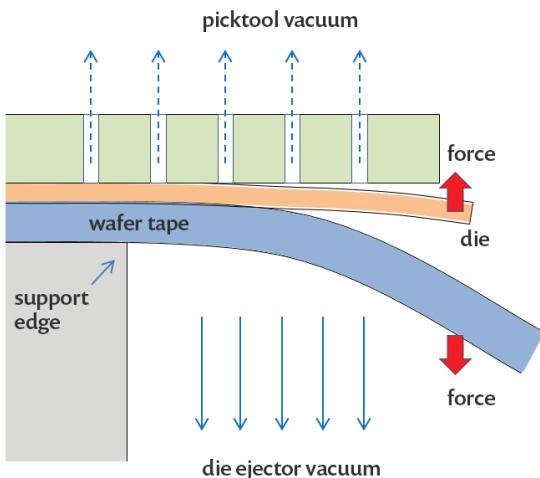


图 2. 左:由 Besi 公司制造的固晶机中的多盘顶针示意图。右:真空拾取工具包含一个带真空压力孔的橡胶件。图注:picktool vacuum - 真空拾取工具;wafer tape - 晶片载带;support edge - 支撑边缘;die ejector vacuum - 裸片真空顶针;force - 力;die - 裸片

片而言，这种装置施加的力过大，容易造成损坏。

就职于瑞士 Besi 公司的资深工艺工程师 Stefan Behler 表示：“大约 8~10 年前，随着芯片变得越来越薄，裸片的损坏率也越来越高。我们需要开发一种全新的载带剥离方法，保证裸片不会过度弯曲。” Besi 公司主要从事开发用于基板制造和晶圆封装的设备和装配工艺，他们的产品和技术广泛应用于消费电子产品、汽车、工业和太阳能等领域。

经过深入探讨后，Behler 和同事们想出了一种新方法——利用圆盘与真空力来更为缓和地移除载带。这种工艺由一组平行的盘组成，盘的作用是支撑微芯片，真空力会使载带保持平坦。盘从外侧边缘向下移动，从而使载带从微芯片上剥落。微芯片下方已剥离和未剥离区域之间的边界称为“剥离边缘”。边缘会逐渐向内移动，剥落的速度则取决于粘合剂的剥离力（图 2）。

这项工艺的优点之一是，剥离前沿的延伸由移动的圆盘控制，裸片只会在剥离时的交界处受力，而传统的多针顶针会对芯片的整块未剥离区域施加压力，由此可以看出，新方法要比传统的多针顶针柔和得多。Behler 解释说：“我们必须确保系统在芯片中产生的应力水平远远低于指定裸片的强度。如果在移

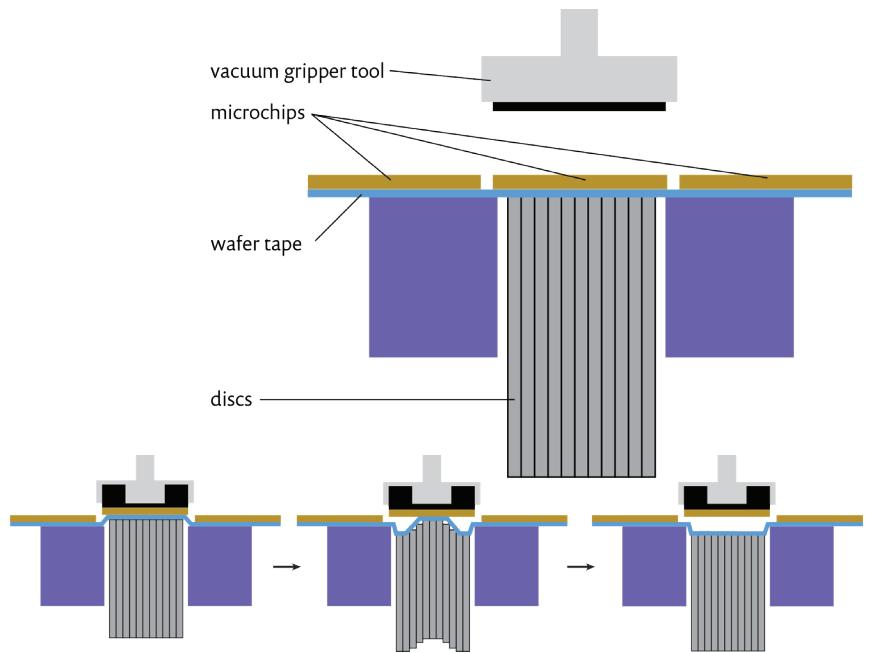


图 3. 上：多盘顶针的布局。下：当载带脱离时，圆盘随时间变化的下降过程，同时拾取工具会将微芯片抓离载带。图注：vacuum gripper tool – 真空拾取工具；microchips – 微芯片；wafer tape – 晶片载带；discs – 圆盘

除载带时导致裸片过度弯曲，就很可能造成芯片开裂或性能降低。”他们将这项发明命名为“多盘顶针”（Multi Disc Ejector），并将它组装进了固晶机（图 3 和图 4）。此项技术目前已被全球的半导体封装工厂广泛使用。

» 借助仿真深入探究顶针

选定设计方案后，设计人员需要深入了解剥离过程中涉及的所有作用力，

并据此选择固晶机的工作参数。Behler 表示，“我们希望了解裸片在剥离过程中的最大弯曲水平，从而调整圆盘高度、速度和真空力大小等参数，最终目标是确保施加在裸片上的应力水平足够低，防止开裂。”为了深入理解具体的物理过程、优化工艺条件，并给顶针的设计者制定参考指南，Behler 使用了 COMSOL Multiphysics® 软件。

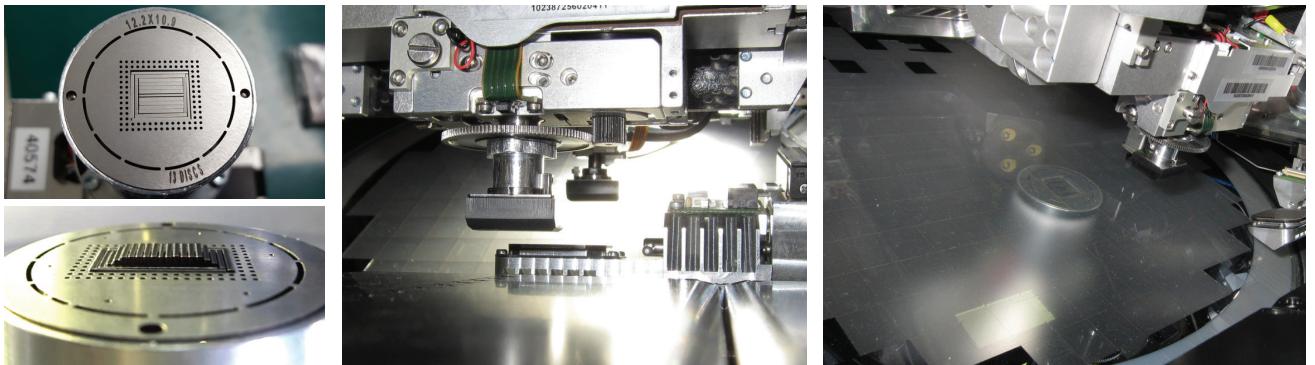


图 4. 左：多盘顶针的俯视图和侧视图。中：固晶机中的拾取工具。右：正在进行载带移除，图像显示了空的晶圆载带和位于其下方的多盘顶针。

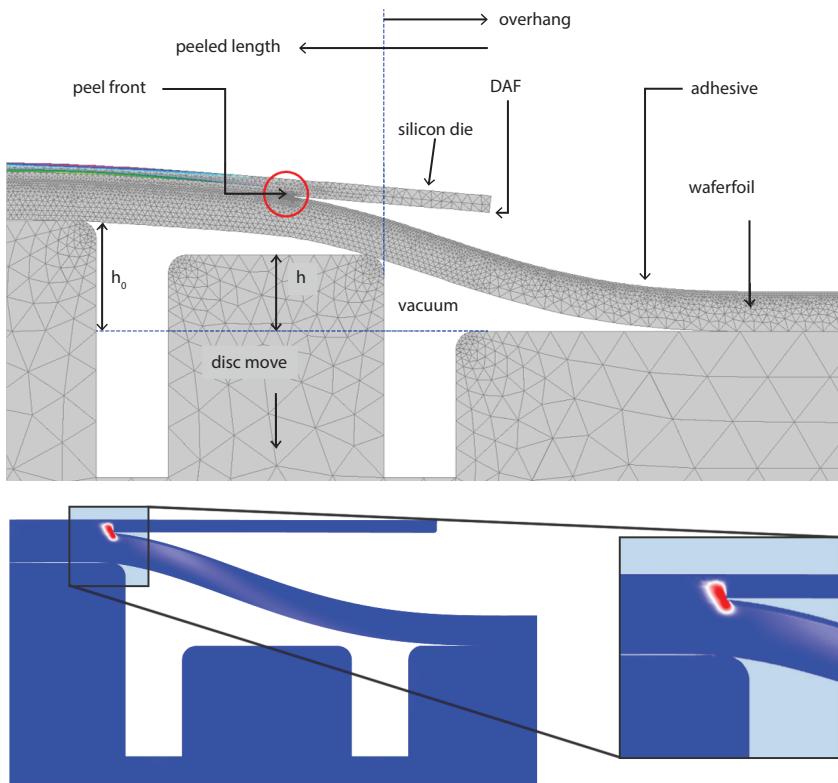


图 5. 上: 模型的几何网格。下: 仿真结果显示了垂直方向的应力。图注: peel front – 剥离前沿; peeled length – 剥离长度; overhang – 悬垂部分; silicon die – 硅裸片; DAF – 盘粘附前沿; adhesive – 粘合剂; waferfoil – 晶片膜; vacuum – 真空; disc move – 盘运动

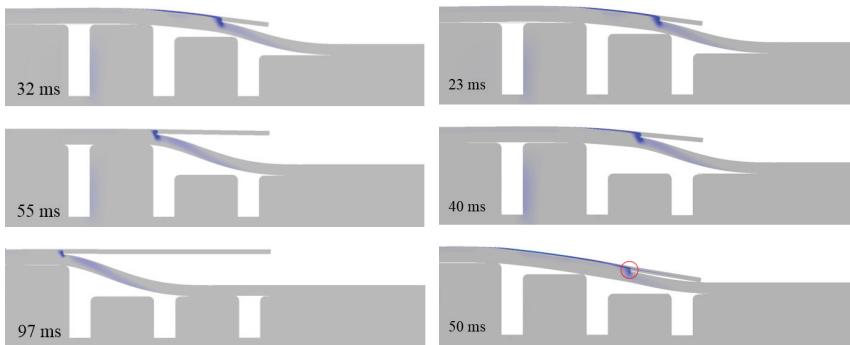


图 6. 仿真结果显示了当剥离前沿以 20 mm/s (左) 和 32 mm/s (右) 的速度移动时的应力水平。当速度为 20 mm/s 时, 整个条状载带顺利地从裸片/芯片上剥离; 当速度为 32 mm/s 时, 裸片/芯片被载带粘住, 无法实现剥离: 红色圆圈指示了剥离前沿向前移动的距离。即使圆盘继续运动, 裸片也不可能再剥离, 这是因为剥离前沿距离盘的最高边缘已经太远了。

首先, Behler 建立了一个静态模型 (图 5), 为模型设置不同盘的几何尺寸、真空压力水平和初始剥离长度,

测试芯片在各种工况下的弯曲状况。基于材料属性可以得到载带脱离裸片的应力, Behler 据此计算出了垂直方向

的应力。

“我对应力结果进行了转换处理, 由此计算出了剥离的能量或剥离力, 然后将应力值与数据表进行比较, 从而得到剥离速度。” Behler 解释说, “我对仿真进行了调整, 查看了剥离前沿在每步仿真中的延伸距离, 并研究了芯片随时间变化的弯曲情况。随着剥离力和盘速度的增大, 弯曲应力和芯片失效的可能性也随之增加。”

剥离前沿的最大延伸速度决定了盘的最佳运动速度 (图 6), 他对该速度进行了计算, 从而可以在不破坏裸片的前提下尽可能提高生产效率。

另外, Behler 利用软件的后处理功能创建了一个动画, 他发现动画能够即时直观地展示载带内的工况。“就算盯着机器, 你也看不见顶针的运作方式。”他解释道, “但动画能够帮助工作人员深入理解设备的内部动态。”

» 为客户建立参考指导

在完成建模工作后, Behler 便能使用多盘顶针来为 Besi 的客户制定参考指导。现在, Behler 的团队可以自由指定固晶机的具体工作参数和芯片设置, 举例来说, 他们能够通过控制存储芯片延伸向尾端盘外的最远距离来保证剥离的顺利进行。考虑到客户使用的芯片尺寸各异, 他们还生产了多组不同型号的盘, 用户可根据需要在固晶机中使用合适的盘。随着存储芯片日趋轻薄, 性能不断提升, 拥有尖端技术的 Besi 公司有信心在计算与存储封装领域始终保持领先地位。◎



Stefan Behler,
瑞士 Besi 公司
高级工艺工程师。

仿真 App 为理工科课程注入活力

美国哈特福德大学将仿真 App 纳入了本科生理工科课程的教学内容，目的是为学生未来的职业发展打下坚实基础。

作者 GARY DAGASTINE

高等教育的目的是传授给学生对其未来职业规划有用的知识和技能。然而对于针对本科生的物理教学而言，达成这一目标并不那么简单。近年来，理工科（包括科学、技术、工程、数学）课程吸引了越来越多的学生。但不同学生的背景和兴趣爱好差异很大，这使得教学难度进一步提升。

一个尤为棘手的难题是：如何将探究式学习融入到课堂教学中。探究式学习是一种引导学生自己提出问题，并通过研究自行解答的教学方式。通过让学生们自己动手解决实际的物理问题，可以使他们更加深入透彻地理解物理概念。然而，在以授课为主的课堂教学中，教材的覆盖面过于宽泛，也没有留出足够的时间去培养学生在特定领域的技能，难以有效地实施这种学习方式。

针对此问题，坐落于美国康涅狄格州的哈特福德大学（University of Hartford）开展了一项教学改革——将多物理场分析软件和仿真 App 作为必修内容纳入大学三年级的流体力学和传热学课程中。

“在哈特福德大学的本科生工程课程中，有很多针对解决问题和项目的学习模块。”机械工程专业的教授 Ivana Milanovic 博士表示，“在使用仿真 App 之前，将探究式学习有效地融入课堂教学中十分困难。然而在 COMSOL Multiphysics® 软件的帮助下，我们可以基于多物理场模型来快速地设计仿真 App，对课堂教学内容进行补充。”

学生们不需要成为数值仿真专家，也能通过界面简洁、易于上手的仿真 App 查看并修改指定的输入、输出以及各种设置，游刃有余地操作强大的计算工具。

得益于此，学生们现在可以方便地进行虚拟实验。他们可以自由修改系统的工作参数、初始条件和边界条件，然后对仿真结果进行可视化，从而透彻地理解物理概念。另外，在哈特福德大学，仿真 App 同时还被用于工业赞助项目的研究。在康涅狄格州，许多涉及航空和制造领域的公司都在使用仿

真软件，仿真 App 教学必然能帮助学生在学习过程中提高对潜在雇主的吸引力。

» App: 从想法到实践

电气与计算机工程系教授 Thomas Eppes 博士开设了使用 COMSOL® 软件进行数学建模的研究生课程。受此启发，Milanovic 博士将仿真 App 相继整合到了大学三年级的流体力学和传热学课程中。

Eppes 教授解释说：“各类研究均表明，在教学中使用 COMSOL 软件是一个正确的决定。当然，学生的反馈对我们而言更有意义。许多学生告诉我，仿真软件不仅帮助他们强化了学习效果，让他们能够更加形象地理解高深复杂的理论概念，更重要的是还让他们接触到了宝贵的仿真方法。99% 的课程完成率正是这一结论最有力的支持。”

鉴于此，Milanovic 开始考虑将建模和仿真软件纳入本科课程教学体系。这一举动引发了诸多讨论。“许多老师认为，熟练使用工业级软件需要学生投入大量的时间，还可能导致学生过度依赖软件。”Milanovic 描述道，“他们还质疑，如果学生没有上过计算流体动力学（CFD）的课程，仿真软件究竟能起到多大的作用。”

“仿真 App 以其卓越的易用性消除了所有疑虑。”Milanovic 表示，“学生们通过课堂讨论和自学，掌握了专业理论知识和分析问题的能力。他们的理论知识

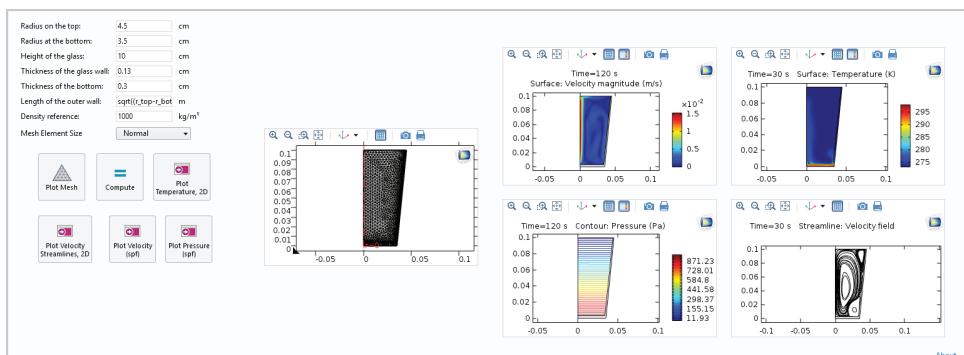


图 1. 就读于哈特福德大学的 Mark Markiewicz 创建了一个仿真 App，用于研究将一杯冷水加热到室温过程中的非等温流动。仿真 App 给出了玻璃杯内的流体速度、温度和压力的计算结果。

和分析能力会通过主要的考试来进行评估。在此过程中，学生们可以使用仿真 App 进行探究式学习。”

» 学生们如何利用 App

Milanovic 开设的大三课程布置了一系列更加复杂的、以仿真为基础的作业，目的是督促学生深入学习诸如变温流体一类的科目，同时培养学生的建模能力和撰写技术报告的能力。这两项能力对于后续研究和未来就业都是必不可少的。借助仿真 App，学生们可以在模型中创建报告，用于描述及记录模型中使用的边界条件和设置，以及数据图表、图形和方程。

在早些时候，学生们曾接触过一个用于分析过滤装置中血样流动的仿真模型，它能研究流体流动分布、电势和粒子定位。现在，学生可以分析不同电压和极性交替对粒子带来的影响。

其他仿真作业包括对非牛顿流体、旋转盘周围的涡流、水净化反应器、轴颈轴承和圆柱体绕流等问题的分析。

在开始学习传热学课程前，学生们已经掌握了基本的仿真技巧。“我打算布置更加复杂的仿真作业，其中包括二维对流冷却、圆柱体内的热传导和薄壳传导等。” Milanovic 表示。

» 让学生了解物理现象背后的“为什么”

除此之外，学生必须将包含指定输入和输出的仿真模型封装为仿真 App。创建仿真 App 后，Milanovic 会提出一系列假设问题，借此加深学生对基本因果关系的理解。学生们会被要求准备一份书面报告，解释仿真结果在不同情况下发生变化的原因。

作为独立研究计划的收尾工作，学生们还需要准备一份工作报告、回顾相关文献、完成技术研究并记录研究结果。

Stefan Keilich 主修机械工程，同时辅修电气工程。他在毕业设计中创建了一个风洞仿真模型，用于模拟汽车周围的气流。“我对空气速度、模型相对于地面的高度、风洞尺寸、模型比例等参数进行了设置。并最终得到了非常好的气流尾迹模式仿真结果。”他评论道。

Keilich 表示，仿真 App 的强大功能让人大开眼界，即使不了解任何技术细节，使用者也能直观地认识物理系统。仿真 App 甚至给予了他一个全新的职业规划。

“仿真 App 增加了我对工程的兴趣。一直以来我只关注机器人和自动化，但现在我对与流体和传热相关的工作也产生了浓厚的兴趣。” Keilich 说道。

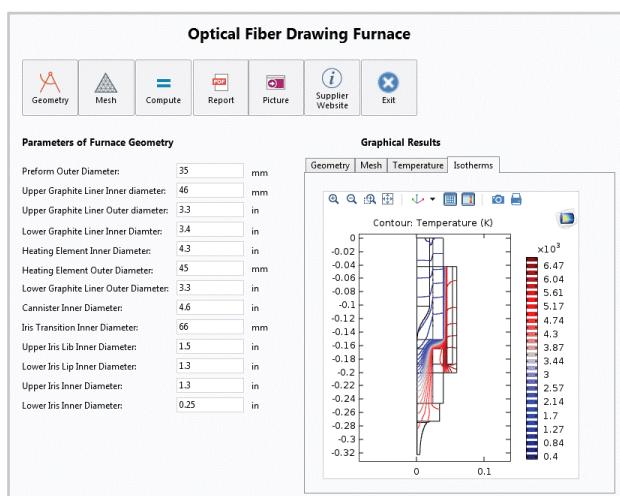


图 2. 光纤仿真 App 可以预测拉丝炉在不同配置下的流体特性。

就读机械工程专业的学生 Mark Markiewicz 表示，COMSOL App 让他能够更加专注于课程作业。他补充道，“我们很难对方程进行可视化，但仿真 App 可以将物理场绘制成三维视图。”

有些仿真 App 更偏重于工业应用。例如，光纤拉丝是一种精密、高灵敏度的工艺，操作人员需要精确控制拉丝炉内的温度和位置，并充入惰性气体，以防止加热元件和衬套被氧化。在针对该应用的仿真 App 中（图 2），用户可以通过修改拉丝炉内的几何尺寸（例如加热元件的直径）对氮气充入速度和温度分布进行研究。

Milanovic 表示，此类试点课程成效显著，无论是学生的成绩、仿真作业的质量，还是对课程的评估，都表明将仿真 App 纳入课堂教学是极为正确的做法。“令人欣喜的是，学生们告诉我，虽然仿真过程常常极具挑战，但是他们十分喜欢使用仿真。”



左图：Ivana Milanovic 教授；右图：顺时针方向依次为：Tom Eppes 教授、Mark Markiewicz、Stefan Keilich 和 Karen Brzostowski。

“我们很难对方程式进行可视化，但 App 可以将物理场绘制成三维视图。”

— MARK MARKIEWICZ, 机械工程专业本科生

MTC 使用仿真 App 革新增材制造零件的设计

英国制造技术中心使用仿真和计算 App 为各个部门的团队提供技术支持,用这种新方法推动零件设计和跨学科研究。

作者 LEXI CARVER

在设计精密零件时,设计人员面临的一项艰巨的挑战是,如何在保证设计的产品能够实现快速批量生产的同时,使其符合极其严格的行业标准。以飞机发动机的燃油喷射器为例,只有高精密零件才能保证飞机的正常工作,让乘客放心地把自身安全交给航空公司。为了实现这一目标,工程师们不仅要优化特定的部件,还需要优化部件的制造工艺。

增材制造又称 3D 打印,近年来发展迅猛。它是一种新颖且前景广阔的制程工艺,不仅有利于减少材料浪费,更重要的是可以生成传统工艺无法加工的

形状。

位于英国考文垂的制造技术中心 (Manufacturing Technology Centre, 简称 MTC) 长期致力于研究增材制造技术,为航空航天产业的零件制造商提供设计和物理样机。其中一种常用的增材制造工艺叫做激光粉体熔化成型 (laser powder bed fusion), 这项技术利用数十微米厚的粉末层,通过激光逐层构建出零件。3D 打印系统会按照预定义的打印路径,制造出具有极小几何细节的零件。

为了验证增材制造零件的质量和性能, MTC 几年前便开始使用 COMSOL

Multiphysics® 软件进行虚拟设计测试、模型验证和性能预测。在过去几年间,他们开始基于 COMSOL 模型创建仿真 App, 让不同的团队能够通过 App 共享仿真分析的强大功能,满足客户的各类需求。

早在仿真 App 开发的初期,我们就曾采访过 MTC 团队(请参阅 2015 年度的《COMSOL News》第 5 页)。两年之后,让我们来看看仿真和计算 App 对 MTC 的设计工作流程和部门间协作产生了怎样的影响。

» 全新的零件设计方法

MTC 物理建模团队负责人 Borja Lazaro Toralles 表示,激光粉体熔化成型技术拥有其他制造工艺不具备的优势。它的沉积速率慢于金属沉积成形工艺,但其精度和分辨率更高。

然而这种工艺有一个缺点:当金属冷却时,材料可能会在沉积了数层之后发生变形。较大的温度梯度和快速冷却引起的热循环会在沉积过程中产生残余应力。这会造成微观结构发生缓慢的变化,进而导致零件发生变形,如图 1 (左)所示。

在某些情况下这些变形并不重要,

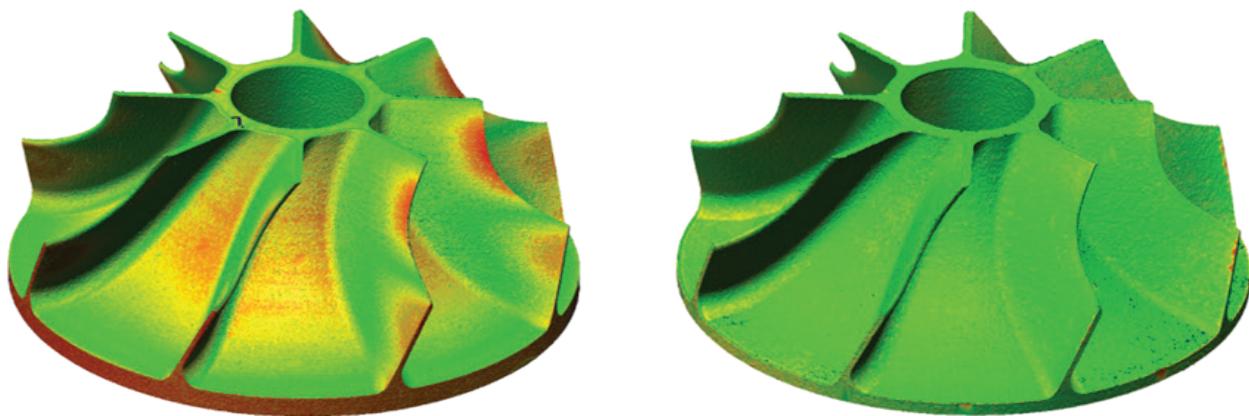


图1. 左:扭曲零件的示例。由于存在残余应力,飞机叶轮的叶片已经发生翘曲。红色表示扭曲相对较大的区域。右:经过扭曲调整后的最终叶轮设计。

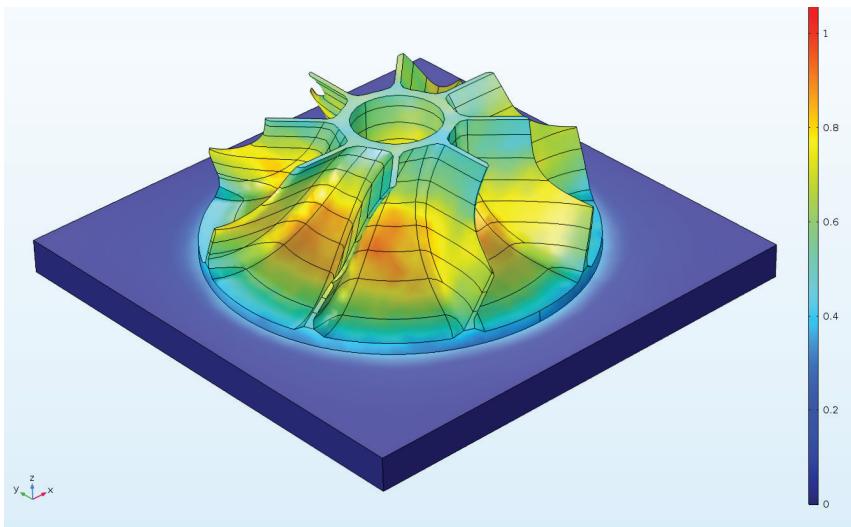


图 2. 仿真结果显示了叶轮中的位移, 并据此预测最终的零件形状。

然而对于有些应用而言, 即使是 100 微米 (0.1 毫米) 的差异, 也会超出标准规格的允许范围, 致使零件无法使用。针对这些应用, MTC 团队需要想出一个能抵消热循环影响的方法。

由于热循环和微观结构的演变无法被消除, MTC 的团队打算从另一个方向来处理这一问题。“我们创建了一个可以用于预测零件构建过程中的应力和变形的仿真模型, 借此来了解零件在打印过程中是如何变形的。”Lazaro Toralles 解释道, “只要掌握了这些信息, 我们就可以‘抵消’零件设计中的变形。这意味着我们能预先掌控翘曲问题, 将最终产品塑造成客户真正想要的形状。”

设计团队巧妙地实际误差出发进行逆向处理, 直接在设计中还原了误差。利用此方法, 设计团队可以基于预测模型找到误差最小的形状, 更加灵活高效地在规定的容差范围内制造零件 (图 1 右)。

此外, 多物理场仿真还为 MTC 的增材制造设计团队提供了一个全新的沟通协作方式。Lazaro Toralles 的团队将 COMSOL 模型封装成了一个可用于预测

翘曲的仿真 App, 同事们无需花费力气去了解原始模型, 也能在 App 中运行仿真, 查看需要修改的设计因素。

当然, 在与零件的设计工程师分享仿真 App 之前, 设计团队首先需要创建高精度的仿真模型。

» 模拟各类复杂零件

如何创建一个可针对任意类型的金属进行形状预测的仿真模型? 实现的方法有很多。Lazaro Toralles 和其研究团队首先定义了一个全新的建模流程, 可用于预测大型零件的最终形状, 随后他们创建了一个仿真模型, 能为设计工程师

“我们创建了一个可用于预测零件构建过程中的应力和变形的仿真模型, 借此来了解零件在打印过程中是如何变形的。”

— BORJA LAZARO TORALLES, MTC 物理建模部门负责人

提供调整设计所需的信息。

他告诉我: “传统的增材制造模型非常精细, 即便是微观结构, 其精度也非常高。然而考虑到计算成本, 这些模型并不适用于模拟大型零件的构建过程。虽然模拟该过程需要耗费大量时间, 但我们还是需要了解整个零件在打印过程中的性能表现。为了解决耗时过长的问题, 我们将构建的打印层“集总”成了一个整体, 并根据实验数据施加了解析温度场。通过这一方式, 我们在保证结果准确性的同时, 缩短了求解时间。”

从航空级钛合金到不锈钢, MTC 在工作过程中需要处理各种类型的金属, 因此为了方便使用模型来测试具有不同形状、尺寸和材料的零件, 他们使 COMSOL 模型中的参数可以调节, 包括材料属性、集总层厚度、夹持在零件上的构建板, 以及网格单元大小等。

设计团队借助 COMSOL® 软件中的结构力学功能, 通过解析温度场对线弹性材料进行了定义, 此类材料的塑性和热膨胀特性会随温度发生变化。该 App 还能自动执行多个 CAD 操作, 为“集总”层生成几何、图形。

考虑到使用集总材料层建模无法模拟出真实的工具路径, 于是仿真生成了一个栅格来进行近似表示。温度场被施加在栅格点上, 随后软件计算出了沉积过程中产生的应力, 并对零件的最终形状进行了预测 (图 2)。

» 分享预测能力

借助仿真分析预测出某个零件中的误差后, 如何以清晰简明的方式将信息传递给设计团队, 这是仿真专业人员面对的另一个挑战。许多公司将建模团队划分成设计和仿真两个业务组, 各组内的人员可以发挥其自身技术优势。然而这种做法会让部件的设计和分析之间

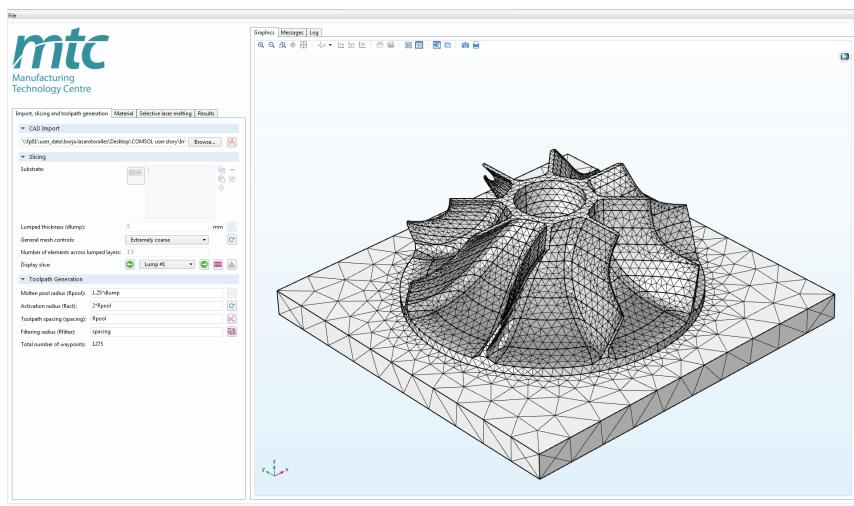


图 3. 借助 MTC 开发的仿真 App, 用户无需了解底层多物理场模型, 便可以在仿真中调整设计并测试修改。

缺乏有效沟通。

仿真专业人员可以将模型封装成简明易用的仿真 App, 以此来消除两个团队之间的交流障碍。设计工程师无需接触复杂的底层仿真模型, 也能在操作界面中运行测试。这大幅简化了对新零件性能的评估过程, 设计工程师现在无需求助仿真专业人员, 也能方便地对参数进行调整。

设计团队使用各类 CAD 平台创建了大量复杂零件, 因此 COMSOL 模型及相关仿真 App 的功能也必须足够强大, 才能满足使用需求。仿真 App 中包含 CAD 导入功能, 用户可以对任意形状进行测试。这对于基于植物、动物、地形等具有自然特征的形状 (即所谓的有机形态) 而言尤为重要, 例如在 Rhino 等许多软件中绘制的图形便是如此。

该仿真 App (图 3) 是利用 COMSOL Multiphysics 中的 “App 开发器” 创建的, 可以针对指定零件 (本例为飞机叶轮) 显示其最终形状、变形和应力水平的仿真结果。

Lazaro Toralles 补充说: “我们自己 (仿真团队) 也经常使用仿真 App, 相

比于原始模型, 在 App 中修改输入参数更加方便。由于设计团队无法独立运行仿真, 所以 App 实际上是特意为他们开发的, 这样设计工程师就能导入零件模型, 并预测零件在打印过程中的变形情况。”

借助 COMSOL Multiphysics 中的 “App 开发器”, Lazaro Toralles 能够完全掌控 App 用户可以访问的内容。随着仿真 App 根据公司的需求而不断改进, 每一项输出和显示内容都是经过反复斟酌才加入到 App 中, 其中部分输入和设置被锁定, 这是为了避免 App 用户

因意外操作而造成错误。此外, 虽然底层模型的设置始终对用户隐藏, 但是仿真能力却在不断地传播。

» 巩固新型协作方式

COMSOL Server™ 产品支持对仿真 App 进行分发、管理和运行。Lazaro Toralles 通过该产品对仿真 App 进行了部署, 拥有访问权限的同事可以在整个企业内部随时访问 App。

仿真彻底改变了 MTC 团队的协作方式。现在, 他们已经建立了一个新的协作流程, 设计人员和仿真工程师可以通过高效的沟通来简化对设计的测试及修改过程, 并最终按客户的需求进行大规模生产。

Lazaro Toralles 承认, 起初他们向其他部门介绍仿真 App 时, 很多人持怀疑态度。“我们不得不努力争取他们的信任。但当他们看到模型能持续稳定地输出可靠的结果后, 终于认识到了仿真的价值。仿真 App 中包含各种功能: 它可以呈现打印的几何切面图、显示网格、引导工程师执行扭曲分析, 并提供反馈信息。”仿真工作现在已经成为 MTC 工作流程中不可或缺的一部分, 大幅提升了物理建模团队和设计团队之间的沟通效率。这一新的方式彻底改变了零件的设计流程。◎



“我们不得不努力争取他们的信任。但当他们看到模型能持续稳定地输出可靠的结果后, 终于认识到了仿真的价值。仿真 App 中包含各种功能: 它可以呈现打印的几何切面图、显示网格、引导工程师执行扭曲分析, 并提供反馈信息。”

—BORJA LAZARO TORALLES, MTC 物理建模部门负责人

全新的高灵敏度压力传感器

巴西的坎皮纳斯大学和空军研究所联合展开研究,推出了新型光纤压力传感器的设计方案。

作者 LEXI CARVER

人们通常听到“光纤”这个词时,首先浮现在脑海的可能是这样一幅画面:细如发丝、扭曲成充满艺术感漂亮形状的发光物,或者从灯座中喷涌而出的光之泉。这些能够传导光的二氧化硅光纤,其用途可远远不止于装饰。光纤于上世纪五十年代被成功开发,目前已广泛应用于电力传输、通信、成像和传感等领域。

具体来说,光纤具有优良的介电属性和广泛的适用性,因而可以在其他传感技术可能失效的环境中使用,例如真空室和海底等极端环境。

» 从光纤传感器到压力传感器

标准光纤是专为电信设备而设计,通常无法用于传感领

域。为了使光纤对所需参数足够敏感,人们必须对其进行加工处理,例如对光纤光栅进行刻印,或者采用特制的微结构光纤。在高灵敏度压力传感器方面,微结构光纤展现出了良好的应用前景。高灵敏度压力传感器可用于石油勘探等领域,技术人员和工程师可以使用它来检测流体压力。图 1 展示了文献报道的三种可用作压力

传感器的光纤。

压力传感器中的微结构光纤通常具有特殊的构造,外部施加的载荷会导致光纤内产生不对称的应力分布,进而使光纤的双折射特性(一种使光束的折射率呈各向异性的材料属性)发生改变,于是便可以通过测量双折射特性的变化来实现传感检测。

位于巴西的坎皮纳斯大学(Instituto de Estudos Avançados)的研究人员Jonas Osório表示:“光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰等优点,并能适用于恶劣环境。同时它们体积小、重量轻,较同类传感器而言有着更加广阔的适用范围。”

然而现有文献资料中报

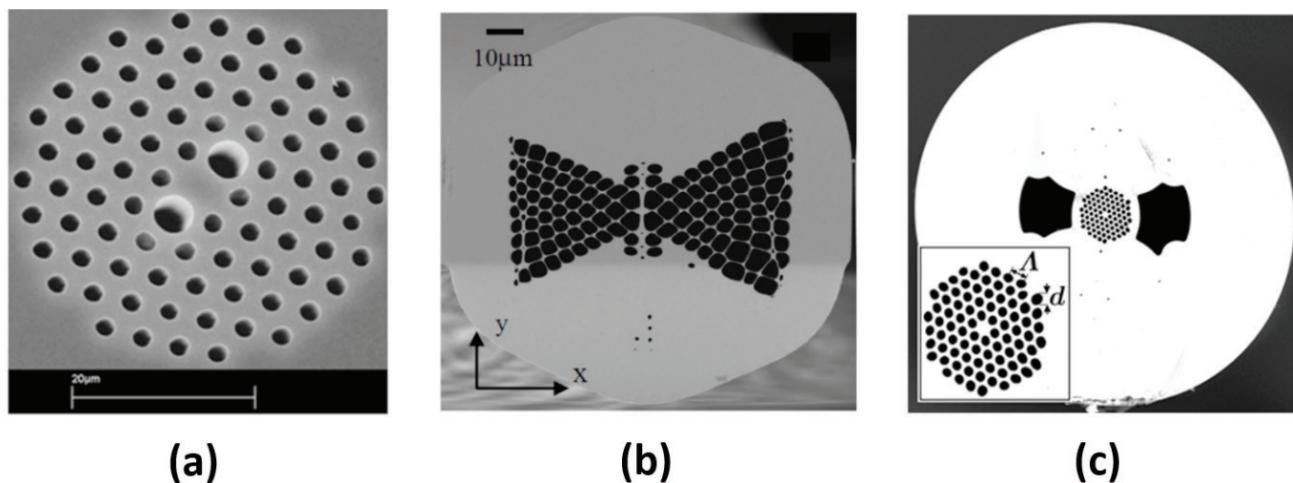


图 1. 压力传感测量装置中的微结构光纤。(a) 光子晶体光纤¹; (b) 带三角形格子孔的微结构光纤²; (c) 侧孔光子晶体光纤³。

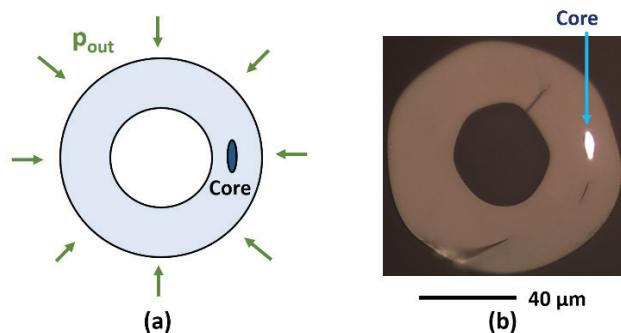


图 2. (a) 嵌入芯式毛细管光纤的概念图, 它显示了嵌有纤芯的毛细管在静水压力下的横截面。(b) 嵌入芯式光纤的横截面。

道的光纤, 其微观结构都相当复杂, 并且需要进行多次拉制, 然后由手工完成精密的结构组装。坎皮纳斯大学和空军研究所正在合作开发一种名为“嵌入芯式毛细管光纤”的特殊类型光纤, 它可以被用于制造高灵敏度的压力传感器。研发人员需要对这类光纤的制造工艺进行简化, 其中包括预成型制备法和直接拉丝法。

» 细致分析几何特征

嵌入芯式毛细管光纤本质上是一根二氧化硅毛细管, 管壁内区域(即纤芯)掺杂有锆(图 2 显示了光纤的结构和横截面图)。与图 1 中典型的压力传感器的微结构光纤相比, 嵌入芯式光纤的结构要简单得多。

空军研究所的研究人员 Marcos Franco 和 Valdir Serrão 与坎皮纳斯大学的 Jonas

Osório 和 Cristiano Cordeiro 合作, 对微结构光纤中由压力引起的双折射现象进行了研究, 据此提出了一种新的设计概念, 并对其进行了验证。他们的目标是设计出能感知静水压力的光纤, 静水压力指的是由静止液体产生的压力, 例如传感器周围的静水。他们在设计过程中使用毛细管光纤(极细的空心管)替代了包含气孔阵列的实心光纤, 以此来产生不对称的应力分布。

他们的目标是最大限度地增强由压力变化引起的双折射率变化, 由此提升光纤的传感能力。他们首先利用解析模型对压力引起的毛细管壁内的位移和机械应力进行了研究(图 3)。

解析模型表明, 由于毛细管结构本身的特性, 外加压力在毛细管内壁上产生了不对称的应力分布。在光弹

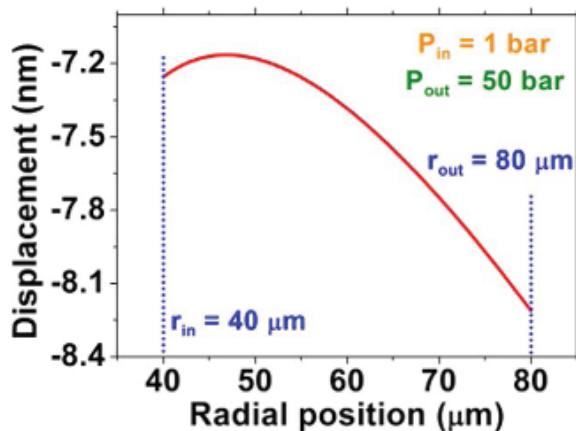


图 3. 研究受压的无内嵌芯毛细管光纤。在初始的位移曲线研究中, 内半径 $r_{in}=40\ \mu\text{m}$, 外半径 $r_{out}=80\ \mu\text{m}$, 内压 P_{in} 为 1 bar, 外压 P_{out} 为 50 bar。

性效应的作用下, 应力会引起材料折射率沿水平和垂直方向发生变化, 从而获得所需的双折射特性。

» 最大限度地提升对压力变化的敏感性

借助 COMSOL Multiphysics® 软件, Franco、Serrão、Cordeiro 和 Osório 向数学模型中添加了椭圆纤芯, 也就是石英毛细管壁中掺杂了锆的区域。通过运行仿真, 他们获得了模式双折射的变化方

式, 以及外加压力和毛细管壁内纤芯的位置之间的关系(图 4)。模式双折射描述了可以穿过纤芯的光学模式的双折射效应。

仿真模型可以计算基本模态在不同压力条件下的有效折射率。当入射的电磁波沿纤芯传播时, 便会出现这种模式。研究表明, 若想最大限度地提升双折射现象对压力的敏感性, 即增强传感器的灵敏度, 必须使纤芯完全嵌入毛细管结构, 并且靠

“ 光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰等优点, 并能适用于恶劣环境。”

—JONAS OSÓRIO, 巴西坎皮纳斯大学研究人员

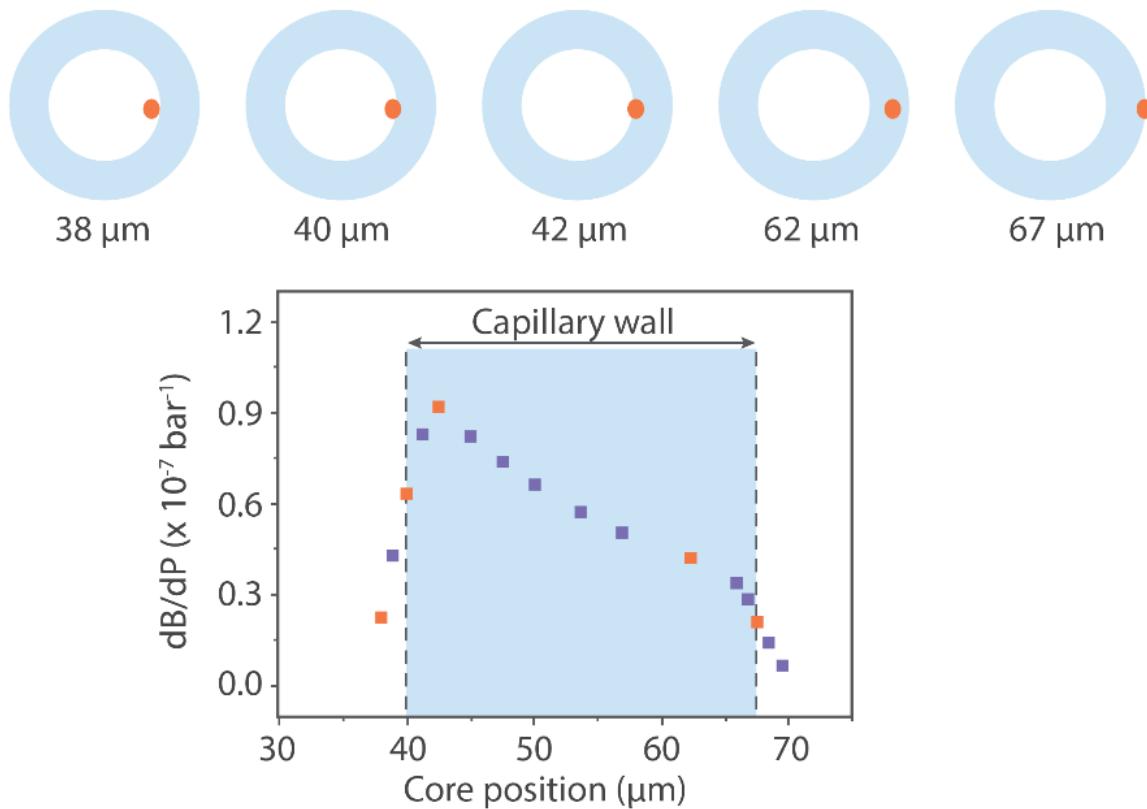


图 4. 模式双折射的变化与毛细管壁内纤芯的位置之间的函数关系。当纤芯非常接近光纤的内半径(顶部中间图)时,由压力变化引起的双折射变化最大。

近内壁。他们分析了不同几何结构中应力分布的变化,最终得出结论:光纤管壁越薄,纤芯位置越接近毛细管的内半径,由压力引起的双折射率的变化就会越大。

» 全新的微结构光纤传感器

在完成了有关双折射对压力的依赖性的研究后, Franco、Serrão、Cordeiro 和 Osório 提出了一种可以简化微结构光纤制造工艺的新方

法。经过验证的新型压力传感器设计可以正常工作。他们将概念设计的灵敏度与现有的复杂光纤结构进行了比较,确认新的设计方案可以产生相近的效果,但是能够减少复杂的组装工作。嵌入芯光纤为高灵敏度光纤压力传感器提供了一个全新的发展方向,相信在不远的将来,石油勘探者可以更加方便地对采集的石油进行实时评估。☉

参考文献

研究小组确定,可以将嵌入芯式光纤作为一种全新的简化压力传感器设计的发展方向。这项研究成果最近发表在自然出版集团旗下的《科学报告》上(nature.com/articles/s41598-017-03206-w)。

¹ H. Y. Fu, et al. "Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer," *Applied Optics*, 47, 15, 2835-2839, 2008.

² A. Anuskiewicz, et al., "Sensing characteristics of the rocking filters in microstructured fibers optimized for hydrostatic pressure measurements," *Optics Express*, 20, 21, 23320-23330, 2012.

³ J. H. Osório, et al., "Photonic-crystal fiber-based pressure sensor for dual environment monitoring," *Applied Optics*, 53, 17, 3668-3672, 2014.

使用建模与仿真 应对电池设计难题

能量密度、功率密度、充电时间、使用寿命、成本和可持续性
是电池设计过程中的技术难点。高效的建模和仿真工具能够帮助研究、开发和设计人员应对这些挑战。

作者 ED FONTES

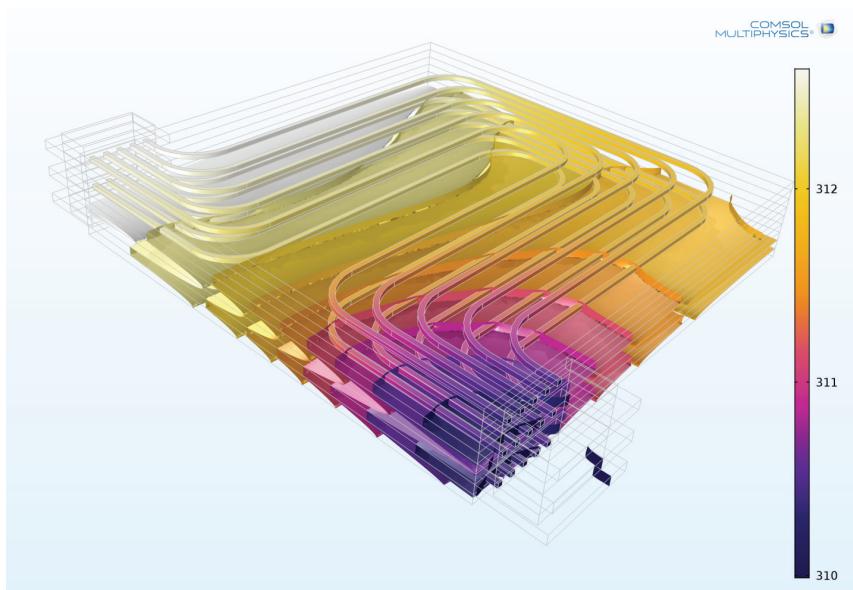


图 1. 液冷式电池组温度曲线的多物理场仿真结果。流体流动和温度取自三维模型，集总的一维模型被用于计算锂离子电池的热源。

在不考虑能量损耗的前提下，电池的化学组成决定了其理论能量密度。化学组成则取决于电极材料和电解质。锂空气电池的能量密度与汽油接近，这或许是电池可能达到的最高能量密度。由于热管理系统组件和集流体会增加电池系统的总重量，因而此类组件的设计也会在很大程度上影响电池系统的能量密度。

功率密度与快速充电

电池的功率密度是决定电动汽车效率的关键因素。电动汽车在制动能量反馈或快速充电的过程中，电池需要具备很高的功率密度，才能在短时间内重获大量的能量。由于电池系统在充电时需要相当高的电流密度，而在放电时的电流密度相对较低，这就给电池功率密度的优化工作带来了难

题。此外，前面提到的热管理系统和集流体，以及电极、隔膜、电解液等电池基础组件的设计均会对功率密度的优化产生重要的影响。

使用寿命、可靠性和安全性

使用寿命是电池设计过程中需要重点考虑的因素，它与电池的安全性和可靠性密切相关。放电、损耗和故障都应当以可控、可监测的方式缓慢地发生。电池的使用寿命不仅与其化学成分有关，电池系统的设计也同样会对使用寿命的长短产生影响。举例来说，不均匀的电流密度分布、不良的充/放电控制和热管理系统都可能会加速电池的损耗，增加故障发生的概率。由金属沉积引发的短路很可能会造成电池系统性能的降低，并可能导致热失控的发生。因此，为实现对电池系统状态和故障风险的持续监测，健康状态监测是电池设计过程中必不可少的一项技术。

成本

相比于传统内燃机中机械动力总成的优化程度而言，针对高功率电池和电机动力总成的优化还不完善。相信当电池组件实现大规模量产，其生产率将会得到提升，同时能够降低成本。

可持续性

可持续性同样是新型电池研发中不能忽视的因素。相关部门须针对与新型电池有关的原材料开采、回收、生产和处理工艺等问题制定相关政策。可持续性是一项主要由政府主导的法律问题，然而电池制造商和汽车公司也应当肩负起商业责任。

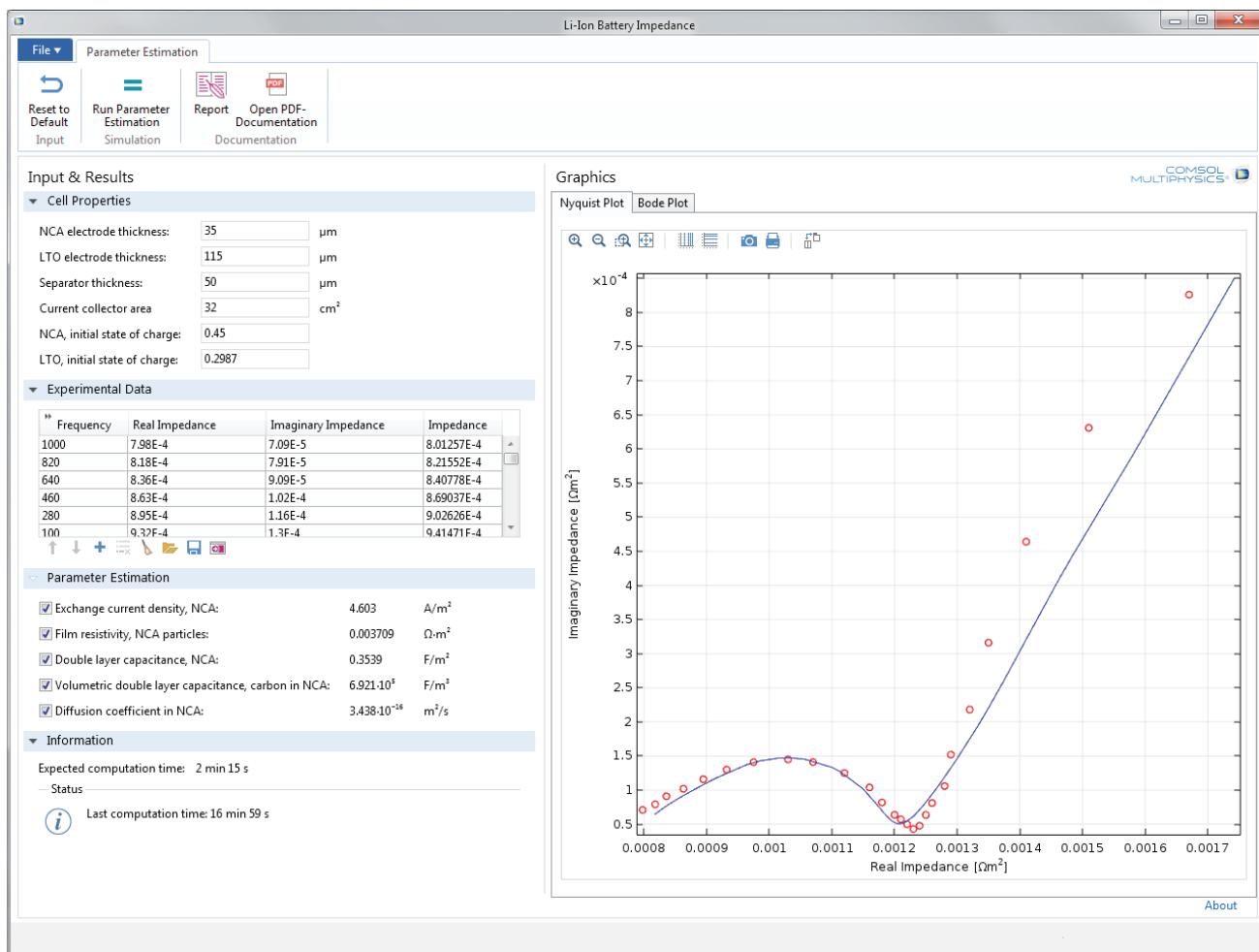


图 2. 此仿真 App 的作用是解释电化学阻抗谱 (EIS) 的实验测量结果, 并展示如何使用模型和测量数据来评估锂离子电池的性能。仿真 App 将 EIS 测量方法的实验数据作为输入, 对测量结果进行模拟, 然后基于实验数据运行参数估计。

» 建模与仿真

建模和仿真工具可以帮助研发人员对电极、电解质和隔膜等电池基础元件进行分析及优化。同时, 热管理、集流体和健康状态监测系统也可以使用高精度的多物理场仿真进行开发。

图 1 显示了电池组冷却板中通道的优化模型。热管理装置是汽车行业中的常见应用, 例如, 菲亚特研究中心 (Fiat Research Center) 使用数值建模研究混合动力汽车中软包电池的热管

理系统¹。

通过将基于电化学阻抗谱 (electrochemical impedance spectroscopy, 简称 EIS) 的实验测量法与数值模型相结合, 研究人员能够有效地推动电池组件的基础研究及健康状态监测技术的开发, 请参考法国研究机构——原子能与可替代能源委员会 (CEA) 发表的文章²。图 2 中展示的仿真 App 可以导入实验数据, 并将数据用于 EIS 物理场模型中。该 App 支持计算电极活性、表面积、不同组件的电导率、反

应物和产物的质量传递属性, 以及电极的荷电状态等各类参数。🔗

参考文献

¹ *The Thermal Management of Li-ion Battery Packs*. Michele Gosso, Antonio Fiumara. Fiat Research Center, Orbassano, Italy. COMSOL News (2012), 48-49.

² *Highly Accurate Li-ion Battery Simulation*. Mikael Cugnet. French Atomic and Alternative Energy Commission (CEA), France. COMSOL News (2013), 44-45.

最好的工程设计都来源于团队协作

作者 SAM PARLER, CDE 公司

对于从事新产品研发的工程师而言，空白的市场充满了无限的机遇。然而硬币总有两面，机遇同时也意味着激烈的市场竞争和争分夺秒的研发进程。近年来，新产品研发竞争日趋白热化。当设计的目标和条件较为明确，而参数输入尚未确定时，拥有出色的交互性、可扩展性、自动化和鲁棒性的仿真工具，可以赋予研发工程师快速评估设计的能力，让他们可以游刃有余地应对紧迫的设计任务。

如今，数值仿真已成为电子元器件设计和开发中不可或缺的工具。传统的“假设—制作—测试”研发流程不仅效率低下，性能测试的成本也十分高昂，难以跟上时代的步伐。举例来说，要想测试电容器的寿命，研发人员需要对电容器进行长达数千小时的运行测试，而且在研发阶段后期才能找到设计缺陷，这并不是一个理想的方式。

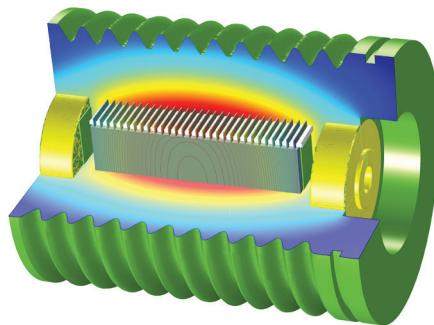
借助仿真工具，研发人员可以非常方便、直接地对电容器的电学和热学性能进行检测。我们大部分的设计工作都针对封装流程及其细节展开，这些都是用户在使用设备时会直接接触到的。在针对复杂设计中的结构应力执行建模时，我们发现大部分的仿真软件性能各异，没有任何一款软件能独立胜任所有工作——虽然 COMSOL® 软件十分接近这一目标。COMSOL 软件可以与 CDE (Cornell Dubilier Electronics) 公司采用的其他研发工具协同工作，帮助我们在质量、时间和成本控制方面取得了巨大的竞争优势。

我们不仅能在 COMSOL 软件中使用各类物理场接口，还能编辑材

料属性、输入自定义常微分方程和偏微分方程，帮助我们实现了与客户的紧密合作，满足了他们的创新设计需求。除了上述功能外，COMSOL 软件还包含与 MATLAB® 软件或 Excel® 电子表格软件的双向接口，可以自动生成电容器的产品评级表。设计工程师需要能够在短时间内深入了解正在开发的产品性能和其他专业知识，而产品的参数空间通常十分庞大，我们很难针对所有的细节进行深入的多元分析。然而在 COMSOL 软件的帮助下，我们可以对产品进行优化、灵敏度分析和反问题求解，深入了解产品各个方面的性能表现。

在 CDE 公司，最优秀的设计和最具鲁棒性的模型都是在众多工程师的密切合作下得到的成果。对于熟悉 COMSOL Multiphysics 软件的仿真专业人员来说，互相分享模型文件是一件十分方便的事情；然而对于那些不具备使用经验的工程师而言，他们却无法方便地使用我们开发的数学模型。但仿真 App 的出现，让一切成为了可能。这些使用“App 开发器”创建的

App 可以通过 COMSOL Server™ 产品进行部署与分享，为设计工作带来了巨大的帮助，让各个领域的工程师都能参与其中。那些不具备专业仿真知识的工程师无需掌握开发模型的方法，也能够独立运行参数分析，并提出新的设计构想。仿真 App 让设计环境变得更加开放包容，各领域的研发工程师可以更加容易地在新产品的最终设计方案上达成共识。◎



CDE 公司推出的新型 297 高压无电晕云母电容器在 12 kHz 和 20 kVrms 运行条件下的剖面图和内部温度分布。



SAM G. PARLER, JR., 注册专业工程师 (P.E.)，现居住在南卡罗来纳州，毕业于克莱姆森大学电子工程系。1988—1991 年间，担任 CDE 公司战略防御计划项目的首席研究员，负责为军事应用开发高能量密度的电解脉冲电容器。1994 年与他人合作创立了 Maven 电容器公司（目前为雅培公司所有），主要从事开发和生产植入式除颤器专用的轻薄型扁平脉冲电容器。Parler 先生是电气与电子工程师协会 (IEEE) 的资深会员，自 1996 年起担任 CDE 公司的研发总监，目前在电容器领域拥有五项专利，其中两项与密封铝电解电容器相关。