

# 多物理场仿真

IEEE  
SPECTRUM

2018年10月

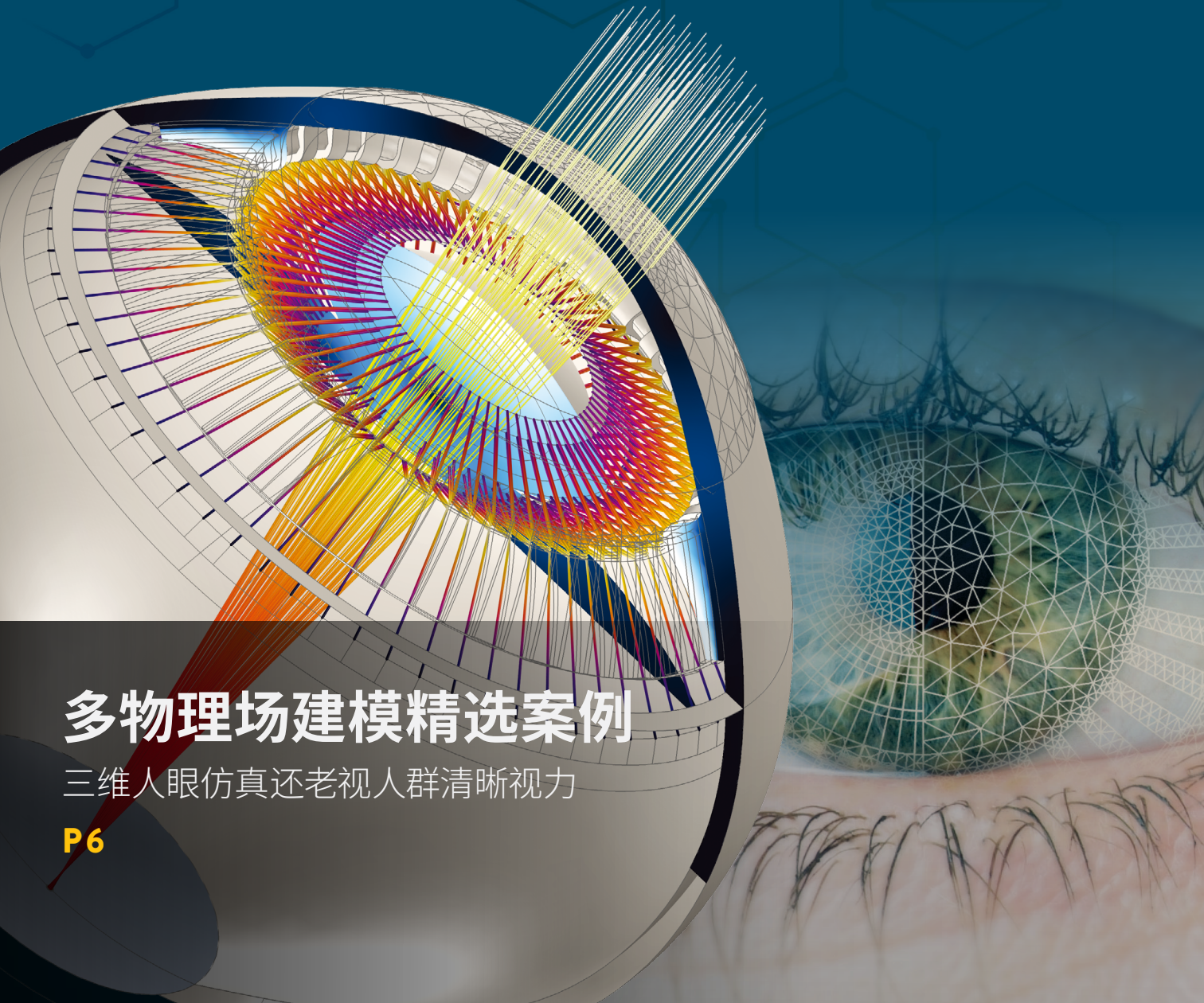
COMSOL

赞助

## 多物理场建模精选案例

三维人眼仿真还老视人群清晰视力

P6



# 用多物理场仿真 创建更美好未来

作者 MICHAEL FORSTER, IEEE 出版社常务董事

多物理场仿真是一种卓越的多样化工具。在医学研究的前沿领域, 仿真为推进眼科手术的可行性提供了有力帮助。著名的瑞士医疗设备公司 Kejako 通过对完整的人眼建模, 研究了这个重要人体器官的力学与光学特性。他们期望这项工作能够为老花眼患者提供有效的手术方案, 从而治愈眼部老化疾病, 帮助患者摆脱难以看清近处物体的困境。

在医疗与健康检测方面, 半导体解决方案的全球领导者——意法半导体公司 (STMicroelectronics) 正在使用多物理场仿真技术优化移动设备与可穿戴设备中的芯片。

有了多物理场仿真技术, 工程师就能处理传统方法难以解决或研究起来过于昂贵的问题。美国通用原子公司 (GeneralAtomics) 的研究人员通过多物理场仿真创建了托卡马克核聚变装置中的磁约束核聚变模型, 让人类离掌握这一产生能源的神器更近一步。

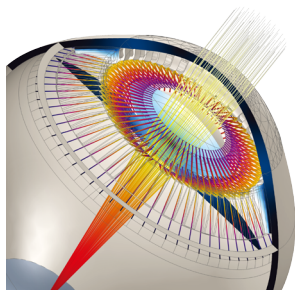
德国捷德货币技术公司 (Giesecke+Devrient Currency Technology) 的物理学家正在使用仿真技术开发高性能纸币处理系统中的传感器, 保障系统每天可以安全地分拣和处理数百万张纸币。

从研发拯救生命的技术到保护全球经济免受假币影响, 多物理场仿真正在助力全世界的机构为更美好的明天提供创新产品。

我衷心希望这本 COMSOL 多物理场仿真特刊中呈现的精彩案例能对您有所启发。

Michael B. Forster, IEEE 出版社常务董事

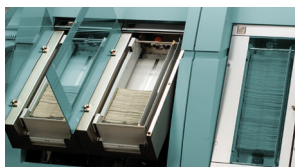
**封面图片:**  
三维参数化人眼仿真获得的总位移及光线轨迹。图片由 Kejako SA 提供。



## 目录

**3 多物理场仿真为发电厂提供安全保障**  
—ABB, 瑞士

**6 三维眼睛模型还老视人群清晰视力**  
—瑞士医疗设备公司, 瑞士



**10 纸币处理系统的智能大脑**  
—德国捷德货币技术公司, 德国

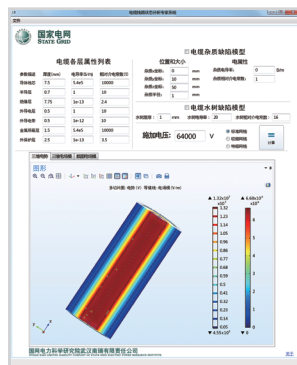


**13 英国国家电网模拟地下电缆线路**  
—英国国家电网公司, 英国

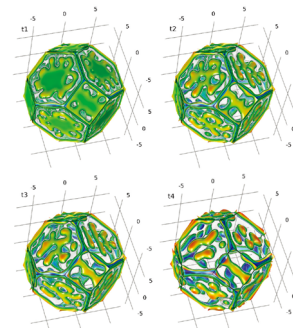
**16 结构可靠性监测与可穿戴设备设计离不开多物理场仿真**  
—意法半导体, 意大利

**18 螺旋天线助力核聚变反应**  
—通用原子能公司, 美国

**21 仿真促进微流体细胞分选器的发展**  
—英国剑桥的技术合作机构, 英国



**24 仿真 APP 助力电网的运行与维护**  
—武汉南瑞集团, 中国



**27 利用多物理场仿真阐释复杂材料特性**  
—加拿大核实验室, 加拿大

**30 向边界元法致敬**  
—丹麦瑞声达公司, 丹麦

**32 卓越设计源于自信**  
—Warwick 音频技术公司, 英国



# 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, 为不间断发电提供保障。

作者 ZACK CONRAD

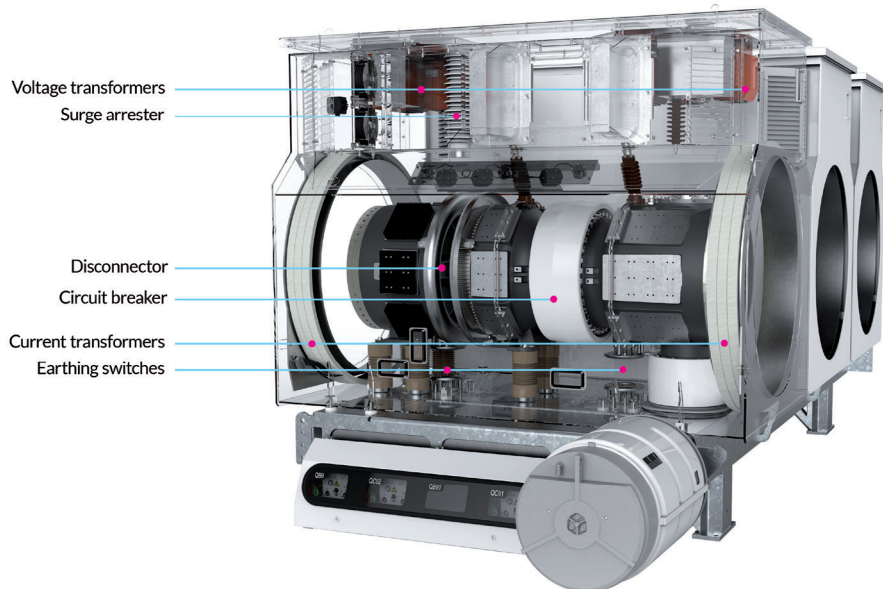


图 1. ABB 发电机断路器 (HEC10-210) 的内视图。图注: Voltage transformers - 电压互感器; Surge arrester - 电涌放电器; Disconnecter - 隔离开关; Circuit breaker - 断路器; Current transformers - 电流互感器; Earthing switches - 接地开关; 图片来源: ABB。

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(简称 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。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。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。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: 由表面镀银的固定桩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

## TYPICAL SINGLE LINE DIAGRAM

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

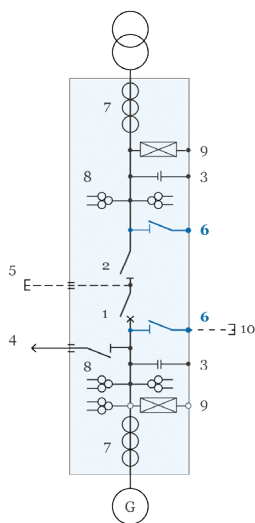


图 2. 典型的断路器系统单线图, 图中标注了接地开关的位置。图注: Generator circuit breaker - 发电机断路器; Series disconnecter - 串联隔离开关; Capacitor - 电容器; Starting disconnecter for SFC - 静态变频器 (SFC) 启动隔离开关; Manual short-circuit connection - 手动短路连接; Earthing switches - 接地开关; Current transformers - 电流互感器; Potential transformer - 电压互感器; Surge arrester - 电涌放电器; Motorized short-circuit connection - 自动短路连接

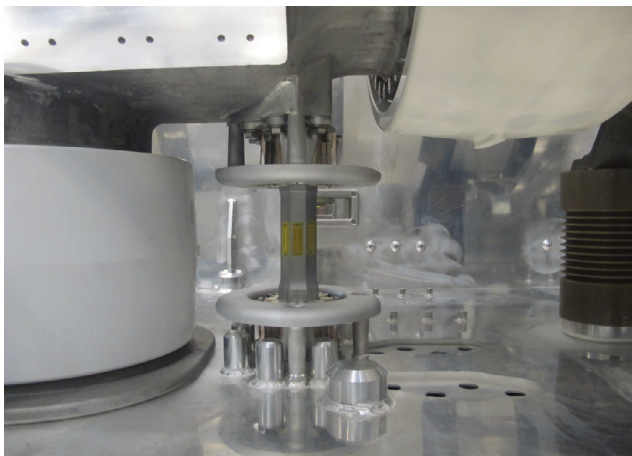


图 3. GCB 中处于闭合状态的接地开关。移动销连接了上下的郁金香式触头。图片来源: ABB。

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。

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

“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。”

— Francesco Agostini, ABB 公司 GCB 技术开发与材料部负责人

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, 借此模拟了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。

计算触点上的总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,



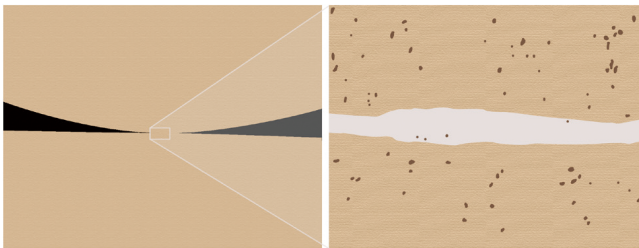


图 4. 焊接区域。左：焊接尖端(上)伸进销(下)的横截面。右：焊接区域局部放大图显示了用于形成合金的熔融金属的生成和凝固过程。图片来源:ABB。

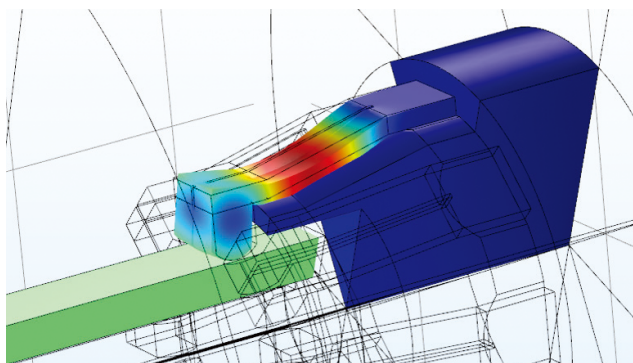
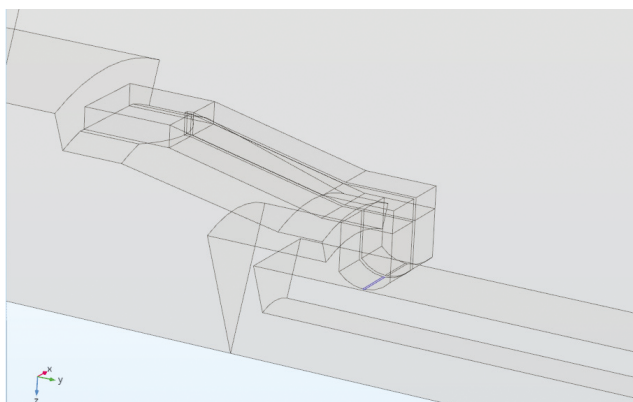


图 5. 上：触头的几何图形。下：郁金香式设计的单个触指的变形情况。图片来源:ABB。

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 500kA 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 软件是一款可以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。”

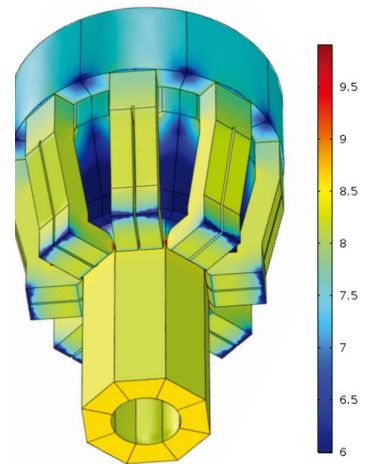
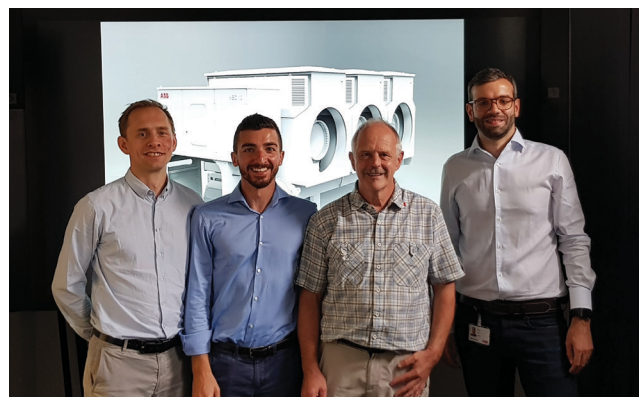


图 6. 郁金香式触头的电流密度对数分布情况。图片来源:ABB。

### 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。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。”



从左到右：Markus Bujotzek, GCB 技术经理；Francesco Agostini, GCB 技术开发与材料部负责人；Jean Claude Mauroux, GCB 技术开发部首席工程师；Alberto Zanetti, 材料研发工程师。

## 三维眼睛模型还老视人群清晰视力

瑞士医疗设备公司 Kejako 的研究团队正在使用多物理场仿真研发一套全新的治疗方案,有望将老年人佩戴老花镜或接受眼部手术的年龄推迟数十年。

作者 GEMMA CHURCH

随着年龄的增长,眼球中的晶状体会逐渐失去弹性,从而出现远视的现象,也就是人们通常所说的老花眼。老花眼是随年龄增长而出现的自然现象。由于视觉功能逐渐下降,当眼睛无法有效地改变自身的光学性能时,就会出现一系列问题:比如眼睛无法获得清晰的物体图像,再比如物体的距离发生变化时,眼睛无法准确聚焦,这时老花眼就形成了。

对于老花眼,大众通常会有两种截然不同的应对方法:要么不做任何治疗,直接戴上老花镜;要么通过可能影响视觉质量的有创手术来治疗(图 1)。

瑞士医疗器械公司 Kejako 研发的创新方案有望为远视人群提供一个介于手术和老花镜之间的可行治疗方法。通过创建三维参数化全眼模型,他们得以了解眼睛随时间退化的根本原因。在此基础上,Kejako 公司正在研发一套创新解决方案,可将人们佩戴老花镜或接受手术的年龄推迟 20 年以上,这一方案即将获得成功。

### » 个性化治疗方案

“我们的解决方案有望成为下一代个性化眼球抗衰老医疗的标准。”KEJAKO 的联合创始人和首席执行官 David

Enfrun 透露,“治疗方案专注于早期治疗,借此帮助患者维持良好的视觉调节机能。通过个性化的抗衰老激光治疗方案,能够让患者再次拥有良好的视力,并保持长达 20 年之久。”

Kejako 公司的治疗方案直接瞄准了老花眼的根本成因,采用一系列无创眼部激光手术来完成治疗。患者从开始出现老花眼症状到后期发展为白内障的整个阶段,都可以接受治疗。通过治疗,患者的视力能够显著恢复,摆脱眼镜的束缚(图 2)。

为了纠正老花眼,该团队将无创治疗与仿真技术结合,推出了名为“晶状体修复”(phakorestitution)的一体化解决方案。

该项研究的突出特点是,借助多物理场仿真建立了三维参数化人眼模型。Enfrun 表示:“我们在 2015 年就开始了这一研发工作,当时使用的是另一款软件。但是很快我们就发现了其中的问题:我们的研究内容属于典型的多物理场问题,但那款软件有非常多的限制,并不适合我们。”

“后来我们了解到 COMSOL 软件具备多物理场分析功能,同时提供高质量的技术支持,所以我们在 2016 年开

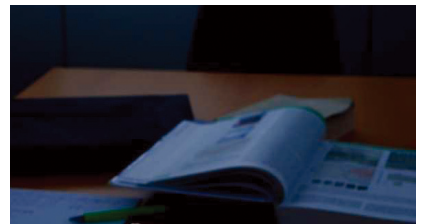
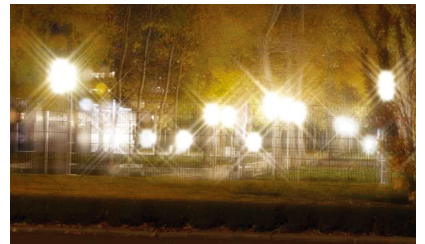


图 1. 目前的手术治疗方案会影响视觉质量,产生光晕(上)、眩光(中)和昏暗光线下视敏度下降(下)等问题。

始与 COMSOL 展开合作。”

全眼模型的建立,有望为每位患者提供个性化的治疗方案。由于每个患者的生理状况和老花眼的严重程度各不相同,个性化治疗方案的重要性是显而易见的。Enfrun 解释说:“单一标准是无法应对所有的老花眼病情的,个性化治疗是解决的有效途径。我们的模型将为个性化治疗打下基础。借助模型,我们可以优化每位患者的治疗方案并提供个性化治疗程序。”

### » 眼睛的物理场

为了创建一个准确的三维参数化人眼模型,研究人员不仅需要考虑到眼睛的所有组织结构,还需要考虑眼睛成



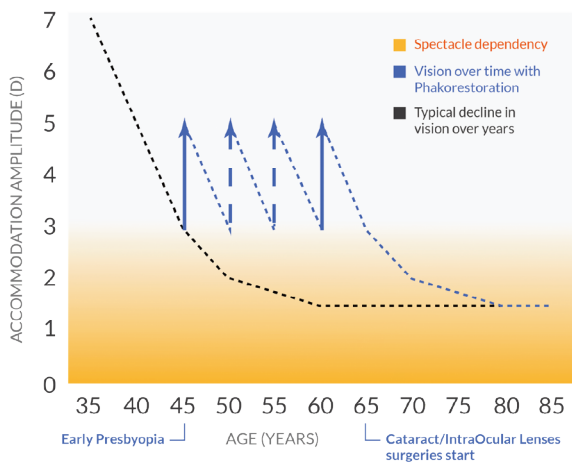


图 2. 视觉调节功能随年龄的变化曲线, 以及“晶状体修复”治疗方案对视觉调节功能的改变。图注: Spectacle dependence - 对眼镜的依赖性; Vision over time with phankorestitution - 接受“晶状体修复”手术后的视力; Typical decline in vision over years - 正常的视力下降曲线; Early presbyopia - 早期老花眼; Cataract/intraocular lenses surgeries start - 白内障/开始接受人工晶体植入手术

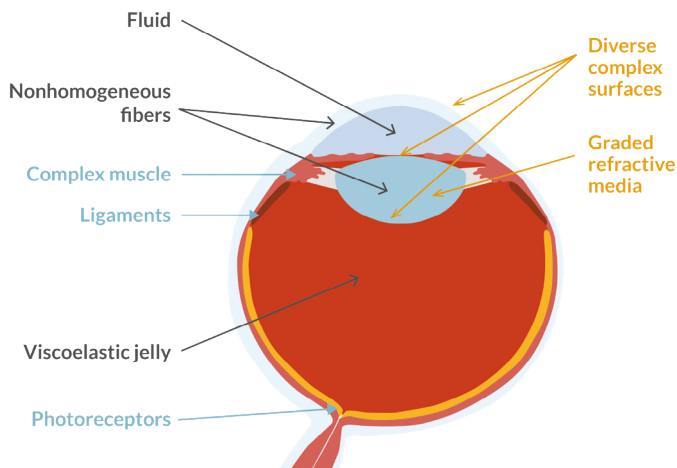


图 3. 多物理场模型中需要考虑的各种眼部结构。图注: Fluid - 液体; Nonhomogeneous fibers - 非均匀纤维; Complex muscle - 复杂的肌肉组织; Ligaments - 韧带; Viscoelastic jelly - 粘弹性胶状体; Photoreceptors - 光感受器; Diverse complex surfaces - 多个复杂表面; Graded refractive media - 梯度折射率介质

像时所涉及的多种物理现象。Kejako 的研发工程师和全眼模型项目负责人 Aurélien Maurer 解释说:“我们需要的是一套包含眼球的力学与光学分析在内的完整解决方案。我们需要对整只眼睛进行建模, 反复调整它的属性以观察不同的结果。”

要实现上述目标, 就必须考虑一系

列复杂的物理场。眼睛内部许多不同的物理和材料特性都应在考虑范围之内, 例如眼房水的流动, 晶状体和角膜材料的光学特征, 由肌肉韧带调节的晶状体折射率, 以及引起晶状体变形的肌肉韧带。

晶状体是由多层不同折射率的物质组成的, 研究团队希望模拟光线穿透

晶状体时的折射率梯度, 因此他们需要将结构力学和射线光学结合起来考虑。Maurer 表示:“之前没有人研究过晶状体的变形程度与折射率梯度之间的关系, 我们决定将这两者进行建模分析, 然后与现有的文献结果对比, 确定我们的建模是否正确。”

研究团队综合考虑了眼球力学和

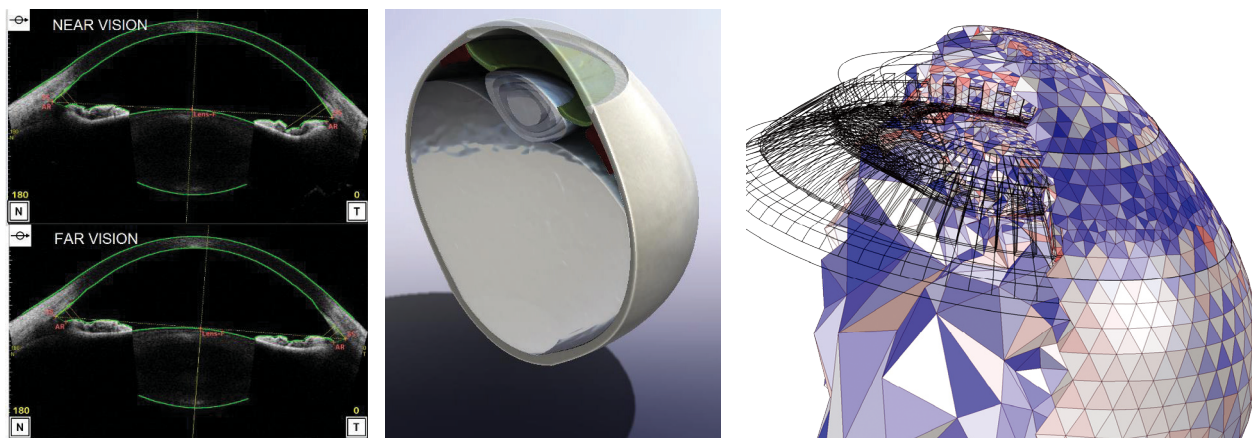


图 4. 从数据测量到模型建立。左: 利用 OCT 得到的典型人眼图像。中: 使用 SOLIDWORKS® 软件基于 OCT 成像结果创建的三维模型的横截面视图。右: 使用 COMSOL® 创建的三维模型的网格图。

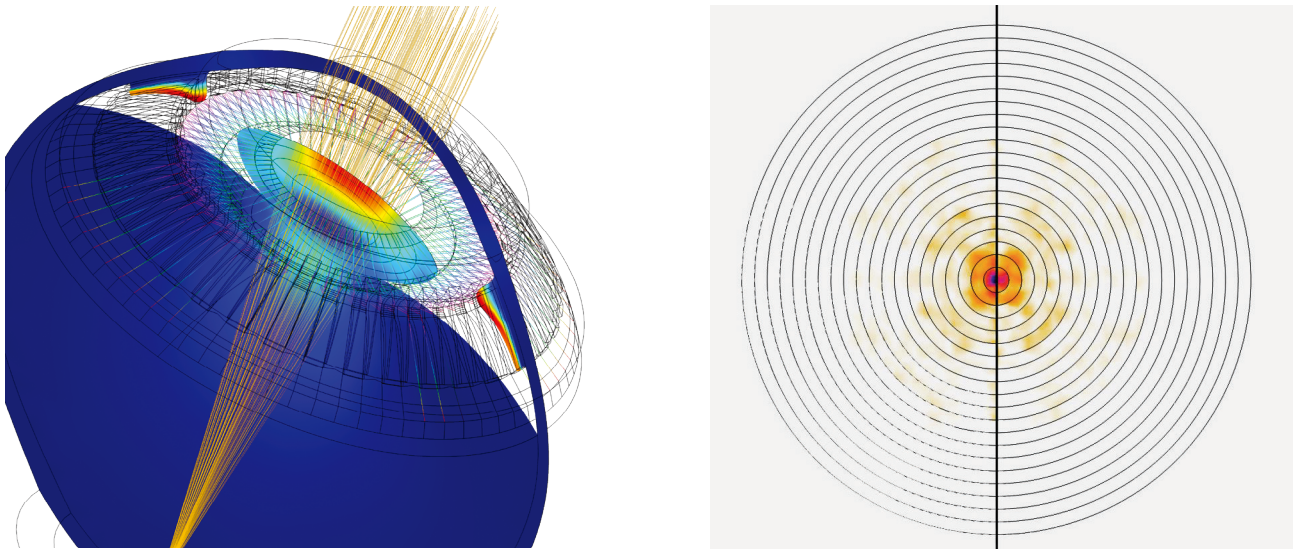


图 5. 左: 仿真结果显示远视的眼球的变形情况和光线追踪。右: 光线穿过眼睛的光学系统后的聚焦情况。颜色越深代表光密度越大。

光学特性,建立了全眼模型,同时利用已有的测量数据对建模结果进行了验证。“如果只模拟眼睛的力学或光学特性,我们无法获得所需要的全部信息。当我们将这些物理特性耦合在一起,就会得到令人惊奇的结果。”Maurer 补充道。

### » 多物理场的研究焦点

利用眼球几何结构的统计测量数值,以及标准光学相干断层扫描(optical coherence tomography,简称 OCT)成像技术,研究团队开始建立仿真模型。他们先对人眼成像,然后将成像信息转换为三维几何结构,并将其导入 COMSOL® 软件中,从而建立模型。

**“ 我们了解到 COMSOL 软件具备多物理场分析功能,同时提供高质量的技术支持。”**

——David Enfrun, Kejato 创始人兼 CEO

他们模拟了眼球的力学特性,包括可拉伸晶状体使其改变形状的复杂肌肉韧带,以及填充眼球的玻璃体液的粘弹性。

研究人员还模拟了巩膜纤维的非均匀特质。来自 Kejako 公司和德国罗斯托克大学(Rostock University)的生物医学博士生 Charles-Olivier Zuber 解释说:“巩膜是眼球的白色部分,是由胶原蛋白构成胶原纤维组成的。所以我们需要分析它的非线性力学性能。”如果在建模时考虑到了所有因素,研究人员就可以确定眼睛的不同组织在特定的视觉状态下相对于休息状态时的位移(图 5 左)。

研究团队利用软件的射线光学功能来追踪光线,他们模拟了晶状体的折射特性和聚焦在视网膜上的光线,研究了平行入射光线(通常认为平行光线是由无限远处的光源发射的)穿透眼睛时的状况。通过这种方式,研究人员不仅能模拟出患者的视力清晰度和客观调节幅度,还可以模拟眼部光学系统(角膜和晶状体)中的光线聚焦情况(图 5 右)。个人的视力水平决定了光

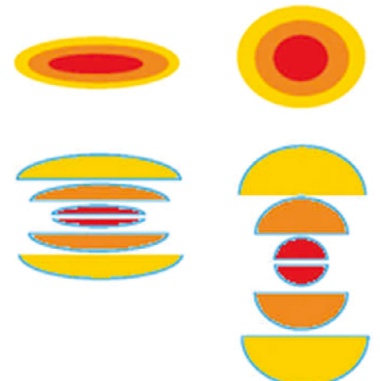


图 6. GRIN 有限多层简化图,每层相当于折射率不变的等效晶状体。左侧为远视状态时的示意图,右侧为近视。颜色代表折射率的值,最高值用红色表示。

线在视网膜上的分布情况。“我们的模型可以真实地反映患者所视之物,这能够帮助我们更好地了解和治疗老花眼。我们可以观察到每个人的视网膜成像情况,进而顺利地改善其视力清晰度。”Maurer 补充道。该团队参考 50 多只人眼的测量结果,对视觉调节分析和老花眼的仿真结果进行了验证。

能够模拟广泛的参数范围,是成功创建三维参数化全眼模型的关键。Zuber 解释说:“通过 COMSOL,我们可以设置与几何构型、材料属性和物理场



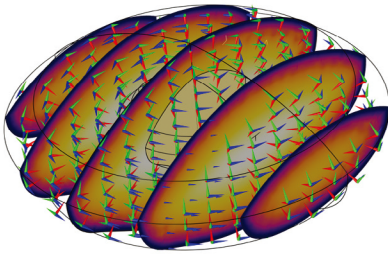


图 7. 曲线坐标系用于表征晶状体的各向异性材料属性。图片显示了 GRIN 分布。

相关的所有参数。能够灵活调整参数，有助于加深我们对问题的理解，从而找到最有效的解决方案。”

### » GRIN: 让你绽开微笑

多物理场仿真的另一优势是，能够帮助研究团队得到一些不可测量的晶状体力学特性值，例如三维参数化全眼模型中的折射率梯度 (gradient of refractive index, 简称 GRIN)。晶状体的折射率具有细微的波动，这会产生特别的反射模式。GRIN 在晶状体上呈空间性连续变化，折射率从表面向中心逐渐增大。这种折射率分布对光的聚焦、像差和视敏度影响极大。仿真可以计算人眼晶状体的 GRIN，对于详细了解光线如何穿过眼部结构至关重要。

GRIN 实现人眼视觉调节时的多倍放大。当晶状体组织 (具有特定的折射率) 随晶状体调节而移动时，针对每个极端状态 (远视或近视)，GRIN 会生成两种不同的光学结构 (图 6)。

晶状体由排列成状似洋葱的同心层的纤维状细胞构成。这种结构是晶状体呈透明状的原因，同时也对晶状体各向异性的力学性能具有显著影响。考虑到这种微观结构，模型利用了软件中的曲线坐标工具对纤维排列进行了表征 (图 7)。直接测量 GRIN 值是极其困难的，为了保证模型的准确性以及据此提出的治疗方案的有效性，团队必须将

“我们的模型可以真实地反映患者所视之物，这能够帮助我们更好地了解和治疗老花眼。”

— Aurélien Maurer, Kejato 研发工程师

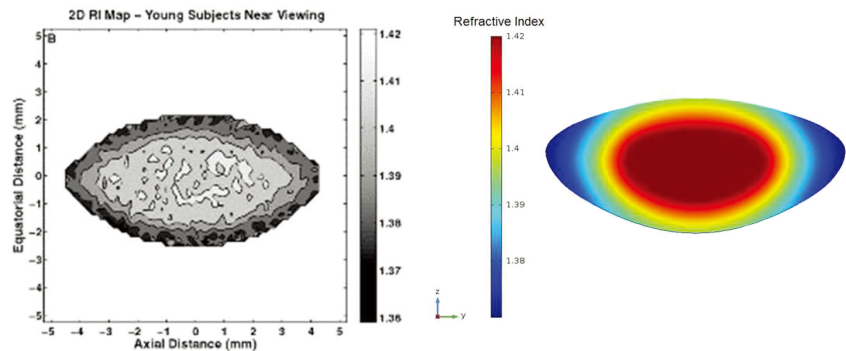


图 8. 左: 使用磁共振成像 (MRI) 测量得到的 GRIN 示例图。右: GRIN 的参数化模型。

GRIN 引入参数化模型 (图 8)。

### » 仿真造福全人类

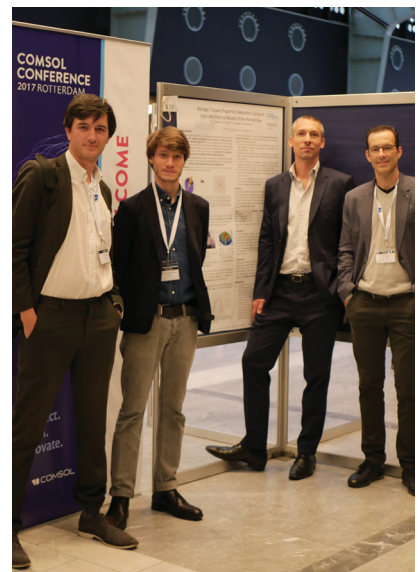
该团队目前正在使用 COMSOL 软件构建仿真 App，借此扩大三维参数化人眼模型的应用范围，为市场的成熟做好准备。

只要将多物理场模型封装到拥有简洁易用界面的仿真 App 中，Kejako 的研究成果即可应用于临床环境，操作流程简单明了。临床医生首先使用标准的 OCT 成像技术对患者的眼睛进行成像，然后将成像信息发送给 Kejako。接着，专家团队创建个性化的三维参数化人眼模型，并进一步优化模型，最终制定出个性化的晶状体还原方案。

截止 2020 年，老花眼的患病人数预计将超过 13 亿，要满足这一不断扩大的市场需求，仿真 App 的应用是非常重要的。利用仿真 App，没有仿真经验的医生也能从多物理场仿真中获益，为每位患者制定治疗方案。

仿真节省了传统的活体内和活体外试验时间。Enfrun 补充道：“当我

们坚信自己能够改善视力健康，我们的解决方案将造福老视人群之时，就会进入试验阶段，COMSOL 软件将帮助我们在更短的时间内实现这一目标。🔗



从左到右: Aurélien Maurer, Charles-Olivier Zuber, David Enfrun 和 John Speyrer。

## 纸币处理系统的智能大脑

为了帮助全世界的现金中心安全地清分与处理纸币,德国捷德货币技术公司的工程师与物理学家使用多物理场仿真开发了磁性、光学与超声传感器,从而对采用模块化设计的高性能纸币处理系统进行了优化。

作者 ZACK CONRAD

“现金为王”这句话会引起我们许多人的共鸣,每天都要经手和处理数百万张纸币的专业现金中心想必对此更有感触。当今的现金流通量超过了以往任何历史时期。纸币数量的激增,加上纸币日益多样化的防伪标志以及复杂的票面设计,大大提高了对现金自动处理系统的要求。全世界的印刷厂都必须保证每张新钞的最高质量。除此之外,中央银行和商业银行以及现金押运公司需要根据钞票面额、货币类型、纸币方向、真伪和整洁度,对纸币进行极其精准又快速地分拣。德国捷德货币技术公司(Giesecke+Devrient Currency Technology,简称捷德货币)的物理学家 Jan Domke 和 Klaus-Thierauf 受专业现金中心的委托,为高性能的模块化纸币处理系统(banknote processing systems,简称 BPS)开发专用传感器(图 1)。

为了降低运作成本,确保处理后的纸币被安全送出,捷德货币的处理系统采用了大批传感器阵列,以保证结果的可重复性和持久的耐用性。纸币被送入机器后,圆皮带传输系统(图 2 左)将对每张纸币的两面进行全面测量。分拣操作依赖于嵌入传输带中的大量传感器,其中假币被精准剔除,破损纸币由于质量欠佳而被检出甚至是撕碎。通过检查的纸币随后被包装成捆,进入现金流通或银行金库。捷德货币制造的典型机器能够在单次检测中从四个方向检测出多种不同的货币类型,这个高效率的系统每小时可处理超过 15 万张纸币。Domke 解释说:“我们的部门负责开发传感器系统及其评估机制,它们是机器的眼睛和大脑,承担着辨别纸币真伪、区分完整或破损

纸币的重要任务。”

### » 探测与分拣

纸币在通过处理系统时将经历三个主传感器检测系统:磁性、光学和超声波传感器。系统利用不同的传感特性,无缝、高效地对纸币进行检查与分拣。磁性传感器负责检测特殊的磁性防伪印记;光学传感器在紫外光、近红外光和可见光范围内根据钞票面额和货币类型实现分类;超声波传感器则检验纸币的残损状态(撕裂、孔洞、胶带等)。为了提高传感器的性能,加快不断发展的开发工作,Domke 和 Thierauf 使用多物理场仿真来深入洞察这些复杂现象背后的物理原理。作为开发过程的重要一环,仿真能够协助团队验证核心概念,开发团队还能够基于仿真结果与算法团队进行后续讨



图 1. BPS X9 是世界上最快的纸币处理系统,每秒可处理 44 张纸币,每小时的有效吞吐量超过 15 万张。中央模块的尺寸为 1.9 米高,5.7 米宽。



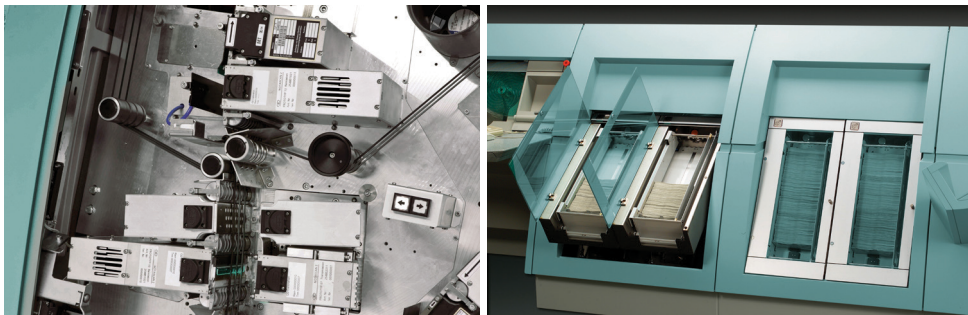
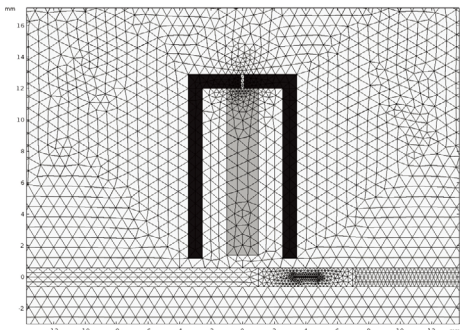


图 2. 左: 传感器模块的一部分, 其中圆皮带传输系统负责将纸币运送过处理系统。右: 分拣到大型交付模块的纸币是自动提款机中的散装纸币的来源之一。

论。“COMSOL® 软件让整个团队能够步调一致地观察与理解相关的物理效应, 是传感器开发过程中不可或缺的重要工具。” Domke 评价道。

### » 检测防伪标记

纸币的关键防伪标记是印在票面上的磁性墨水, 它相当于磁性探针, 当纸币穿过传输系统时, 这些探针将与传感器中永磁体的磁场相互作用。团队可以实时分析场线所受的影响, 以此作为指示信号, 并根据特定算法生成所需的信息。为



为了确保算法的准确性, 团队需要预先对磁场的变化进行模拟。Thierauf 为此求助于数值仿真, 其团队在软件

中创建了磁性传感器组件, 预定义其磁化强度, 然后利用动网格技术模拟软磁探针穿过传感器的情况。他们可以参照模型中获取的磁场读数调整参数, 从而得到满足检测需要的磁场形状。

当探针经过传感器时, 与磁场发生相互作用。磁性传感器探测到磁场变化后, 将产生的信号以电响应的形式从系统中发射出来。信号强度取决于探针与磁铁的距离, 而仿真对于理解这种依赖性至关重要。Thierauf 解释说: “磁场形成后, 你就能计算出信号强度与距离之

间的关系。基于这项数据, 我们就可以根据客户的要求对传感器进行优化, 然后在更专业的模型中改进设计。”

### » 对纸币的整洁度要求

在分拣纸币时, 除了防伪标记外, 还需要考虑纸币的整洁程度。进入处理系统的纸币可能已经破损、带有缺角或折角、污渍、涂鸦或胶带, 或者与其他纸币粘在一起。为了准确检测出粘在一起或黏有胶带的纸币, Domke 的团队使用了超声波阵列传感器。当纸币到达传感器的位置时, 传感器发射的脉冲超声信号穿过纸币到达另一侧的接收器。这里存在的主要问题在于实际上只有 1% 或更少的信号透过纸币到达了接收器; 99% 的声能都被反射回来。为此, 系统采用了 24 对发射器以提高接收器的分辨率(图 3)。然而大量发射器造成的信号串扰问题, 让管理信号时序、阻尼元件和几何构造成为了一个

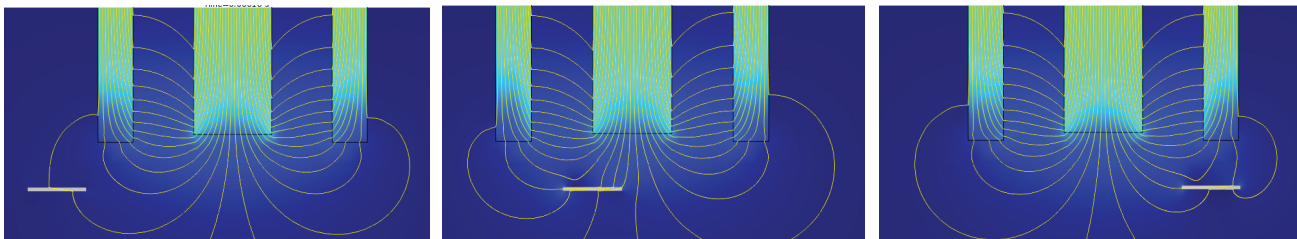


图 3. 通过磁性传感器的磁探针仿真。上: 永磁体(灰色)和铁芯(黑色)引导传感器的磁场。动网格用于模拟穿过虚拟传送通道的探针。下: 经过传感器并导致磁场变形的探针的时序。



图 4. 由 24 个发射器组成的阵列可以发射通过纸币的超声信号。插图  
为 20 欧元的纸币。

复杂而棘手的难题。

Domke 及其团队利用多物理场仿真来应对这些挑战。当纸币经过传感器时会反射超声信号，由于声波的衍射现象，部分声波将绕过纸币被接收器提取（图 4）。由于这种衍射信号会干扰穿过纸币的微弱信号，因此接收器的检测操作需要在衍射信号到达之前完成。借助多物理场仿真，Domke 还模拟了声学通道以引导脉冲信号。通过模拟近场及远场特性、最大信号幅度和声场衰减，Domke 能够减少发射

信号的失真。Domke 解释说：“仿真是分析此类情况的关键工具，因为实验测量根本无法在如此微小的尺度下进行。如果我们能够从设计之初就通过仿真调整几何结构与时序，就能获得清晰且不受干扰的传输信息。”

### 未来的改进

DOMKE 和 THIERAUF 还将多物理场仿真引入到传感器开发流程的其他方面，并致力于扩展仿真的应用范围。他们采用多物理场方法来模拟超声换能器，

“仿真是分析此类情况的关键工具，因为实验测量根本无法在如此微小的尺度下进行。”

——JAN DOMKE, G+D CURRENCY TECHNOLOGY 物理学家

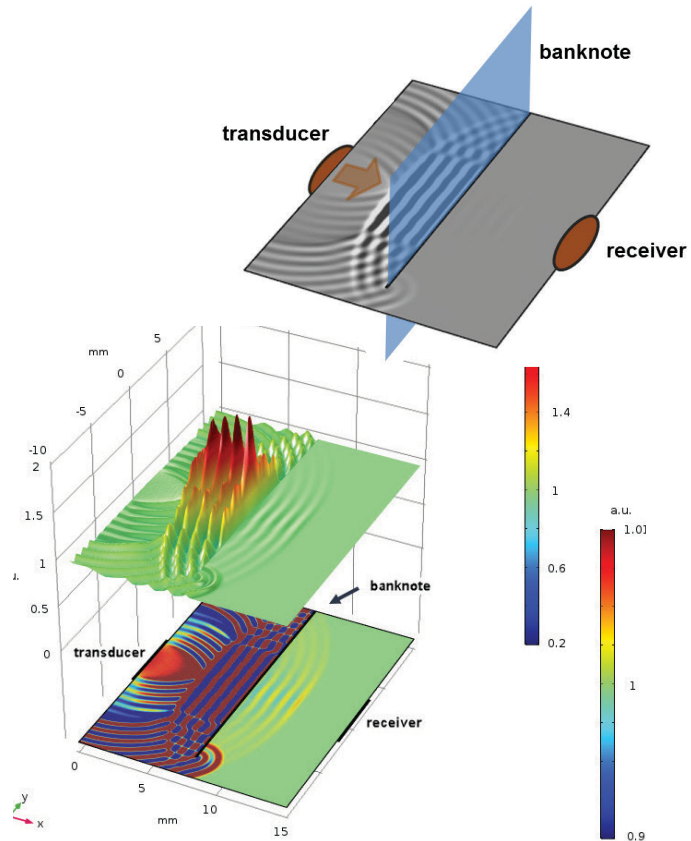


图 5. 换能器发射的声子波传播经过纸币边缘，最终到达接收器。上：模拟装置的草图。下：子波向纸币传播过程的两种表征方式。在此图中，一半子波撞击到纸币上，但只有一小分子波穿过纸币，而大部分子波在纸币边缘被衍射出去。图注：transducer – 换能器；banknote – 纸币；receiver – 接收器

并对印刷电路板的热管理系统进行传热分析。他们还将仿真结果与实验数据进行比较，高度吻合的结果是模型准确性的最有力证明。在未来，他们希望持续的仿真分析让团队的研究工作更加灵活，帮助他们更好地贴合客户需求，优化伪钞的分拣效果，尽可能让钞票整洁地呈现在人们面前。🔗



德国捷德货币公司的物理学家 Klaus Thierauf 和 Jan Domke。



# 英国国家电网模拟 地下电缆线路

仿真技术可用于准确预测地下电缆安全额定值范围,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,问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公司承担,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展示了电网中的一段高压地下电缆系统。

英国国家电网公司面临着不少挑战: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。

## » 面临的挑战

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(IEC)颁布,并获得国际大电力系统委员会(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

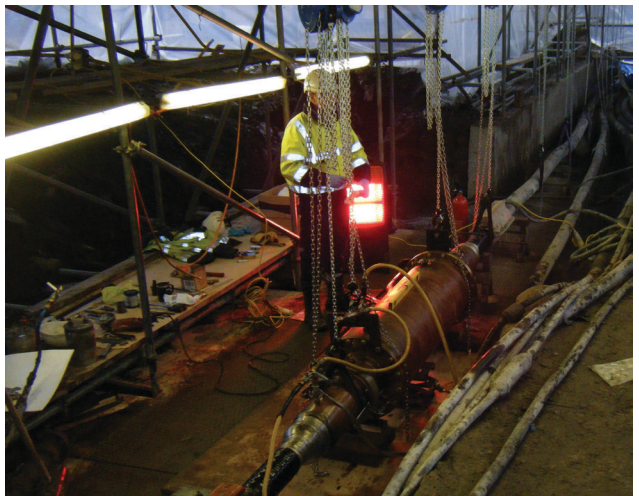


图1. 一段穿过隧道(上)和埋于地下(下)的高压电缆系统。

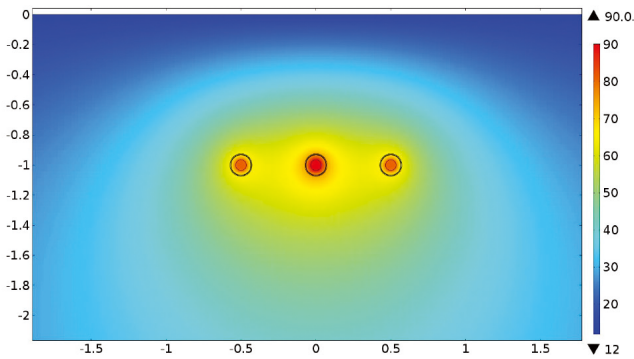


图 2. 仿真结果显示了土壤中电缆的热分布。

存在的, 它们是大电力系统的一部分, 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, 或者只是并排通过, 但只要距离接近, 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, 简称 TDHVL) 与英国国家电网公司合作开展了一系列创新项目。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。双方密切合作, TDHVL 的工程师使用 COMSOL Mul-

tiphysics® 软件进行有限元分析。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, 因为其中充满的微气穴会阻碍热量的散失, 这就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

对于英国国家电网公司而言, 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。例如两根电缆实际相距 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

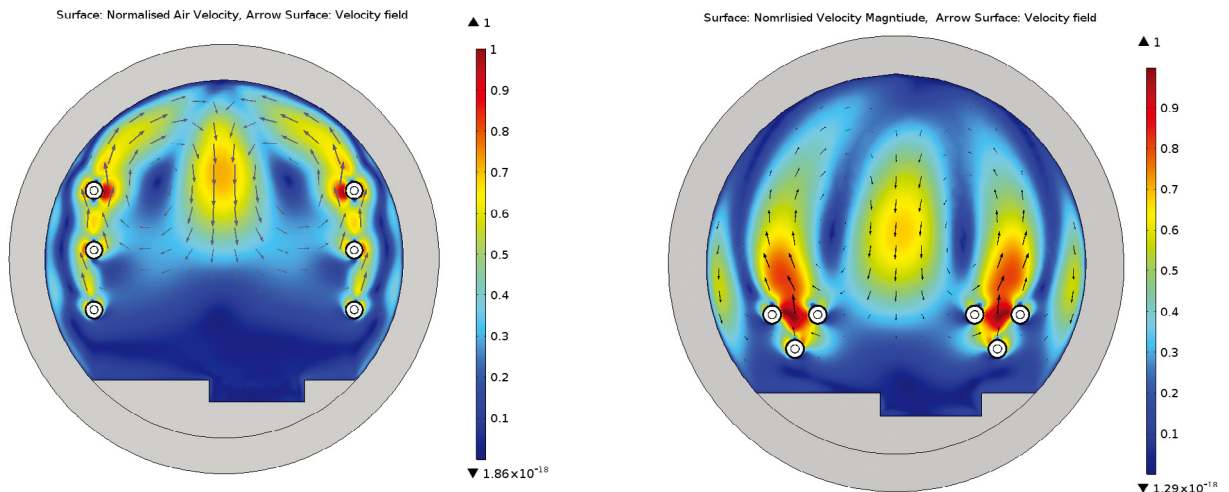


图 3. 水平铺设的长隧道横截面内归一化的气流分布仿真结果。



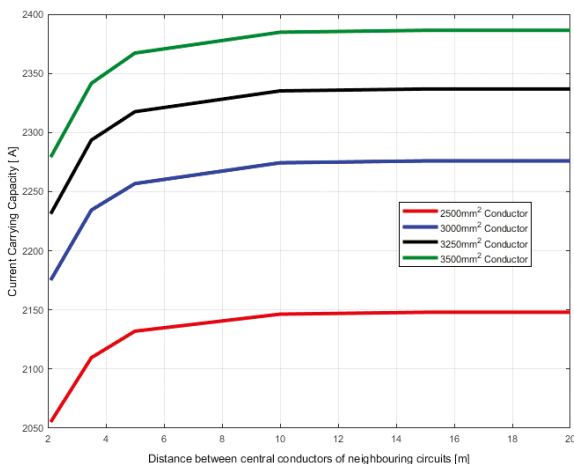


图 4. COMSOL® 模型显示了四个相同载流能力的电路, 区别仅在于它们与相邻电路的距离不同。

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确的反馈。”Scott 评价道。

“我们以前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抛出了另一个难题: 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。

#### » 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 kV 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

“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 SCOT, 英国国家电网公司测绘工程师



图 5. 将分段电缆连接在一起的安装接头。

起来。如果一项即将动工的工程涉及到安装电缆, 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。”

# 结构可靠性监测与可穿戴设备设计离不开多物理场仿真

意法半导体 (STMicroelectronics) 的工程师使用数值仿真优化半导体解决方案, 满足广泛的应用需求。

作者 VALERIO MARRA

随着大众对小型化电子产品和物联网 (IoT) 设备的需求日益增加, 设计执行器、控制器、驱动器、传感器以及变送器等微型装置的专业人员面临着各种新的挑战。从响应装置到可穿戴监测仪, 从办公室节能照明到工厂自动化, 工程师通过一件件兼具智慧和品质的创新产品将半导体微型元件和宏观世界应用联结在一起。这一前沿科技的趋势启发了工程师通过仿真的虚拟世界探索新的想法和解决方案。

意法半导体是全球半导体解决方案的领导者, 仅在研发领域就拥有 7500 名员工。意法半导体的技术研发工程师 Lucia Zullino 解释了他们的工作内容: “在半导体领域, 我们需要分析极其微小的结构, 并了解这些微型结构在不同环境与应用中, 与大型封装之间的相互作用。”

对于半导体制造商而言, 材料与设计的选择至关重要。仿真可以在这个环节对材料的评估与参数的选择起着重要作用。“我们的大量工作都是通过 COMSOL Multiphysics® 软件完

成的, 它可以帮助我们验证假设和优化产品。” Zullino 解释说, “在意法半导体, 大约 30 名仿真工程师分属于不同部门, 在不同工作地点, 但我们正在不断积累与分享从各个项目中获取的仿真经验。”

## » 多物理场仿真推动研究与产品设计

借助仿真, 工程师能够在各个研发阶段全面分析多款产品涉及的多种物理场之间的相互作用。一些实例包括: 通过优化外延反应器来加快晶圆制造, 控制湿法蚀刻过程中的反应物流场畸变, 以及在微观层面上研究裸片与封装的相互作用, 等等。除微芯片设计与制造外, 意法半导体的工程师还负责微型执行器的设计, 例如应用于光学和摄像头的识别技术中的微镜。在另一个涉及执行器的项目中, 工程师使用仿真来研究打印头, 并对两种不同工作原理的有效性进行比较, 探究应该使用压力式泡沫还是锆钛酸铅 PZT 压电陶瓷驱动膜来驱动墨水。通过仿真, 研究人员确定

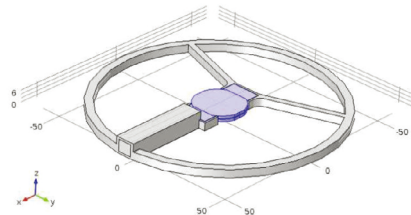


图 1. 嵌入式结构健康监测传感器的几何图形。传感零件突出显示为蓝色。

了使用薄膜压电打印头, 因为这种打印头可以与多种墨水更好地兼容, 具有更快的打印速度、优越的打印输出品质和更持久的使用寿命。

## » 监测混凝土结构的健康状况

意大利政府和企业机构多年来一直在利用各种传感技术监测混凝土的健康状况。他们在一个开发项目中引入仿真技术, 用于分析混凝土的属性, 以及预测嵌入式传感器 (图 1) 的性能随使用年限的变化, 并将相关信息传递到地面的系统。在意大利, 很多建筑结构中都部署了结构健康监测系统来评估混凝土的健康状况, 并记录任何可能对

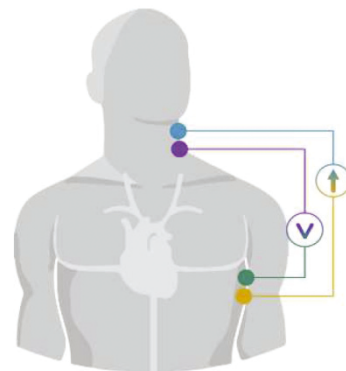


图 2. 器官生物阻抗的测量技术。



“ 我们可以更快地评估材料和结构, 筛选出最好的设计方案, 这意味着缩短开发时间, 制定更明智的技术决策和更及时的商业决策。

—— Lucia Zullino, 意法半导体技术研发工程师

系统的结构完整性和可靠性造成破坏的不可预测应力。

### » 可穿戴医疗监测设备

多年以来, 意法半导体研发出了许多医疗保健产品。他们曾设计了一款可测量心脏等人体内部器官的生物阻抗的贴片(图 2)。研究人员基于人体器官的医学成像创建了一个三维模型(图 3), 借此在频域中运行低频电磁场仿真(图

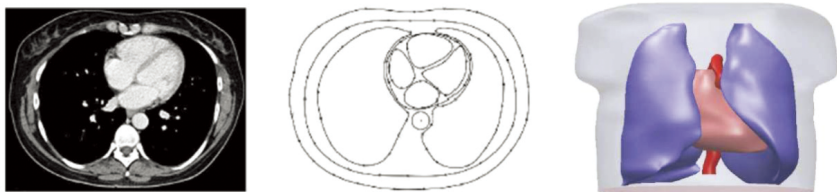


图 3. 利用计算机断层扫描(CT)成像创建的三维模型(左), 其中使用 CAD 工具进行后处理(中), 然后进行插值以生成分析所需的体(右)。

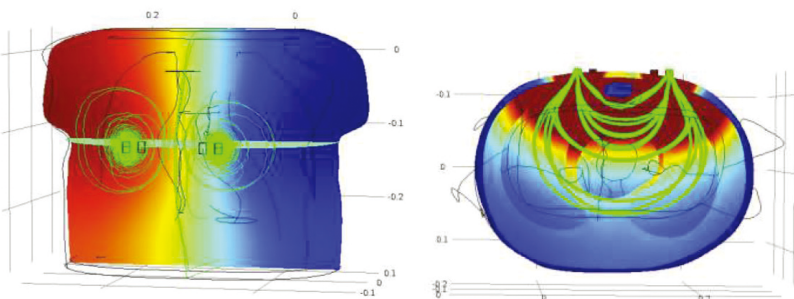


图 4. 仿真结果显示人体躯干中的电压和电流分布。

4), 并评估电极的形状和位置对生理参数测量结果的影响。仿真结果(图 5)与实际测量的数据非常吻合, 为开发用于监测生理变化的可穿戴贴片提供了有力支持。这些传感器将帮助医生有效监控各类心脏疾病, 采集实时数据, 将最前沿的技术转化为患者可享受

的优质医疗护理服务。

### » 通过仿真解决复杂问题

“我们通过仿真找出了很多潜在问题, 从而在优化半导体、实现产品赋能方面做得更出色。仿真能够帮助我们切实改进面向内部和外部客户的产品设计。” Zullino 评论道。她和同事们预期仿真将在研发的各个方面大显身手, 同时提及了有关模拟封装内湿度和腐蚀的可行性研究。

“我们可以更快地评估材料和结构, 筛选出最好的设计方案, 这意味着缩短开发时间, 制定更明智的技术决策和更及时的商业决策。”Zullino 总结道。“与物理测试不同的是, 我们能以零成本的方式提出并验证新的解决方案。仿真是推动创新的关键工具之一。”

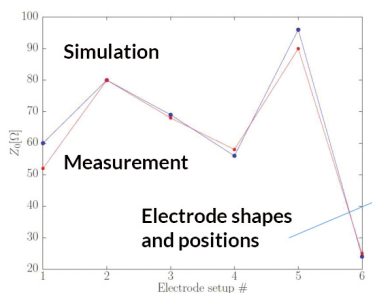


图 5. 比较不同的电极形状和位置(下)对应的生物阻抗测量值和模拟值(左)。



# 螺旋天线助力核聚变反应

通用原子能的科研人员利用多物理场仿真在 DIII-D 托卡马克装置中实现磁约束聚变。

作者 GEMMA CHURCH

核聚变是一种能量产生的过程。在这个过程中，两个氘原子被加速到足以克服库仑力的水平，融合成一个氦原子和一个中子，释放出巨大的能量。核聚变不仅无碳排放，废弃物产生量少，而且燃料来源几乎取之不尽，因此堪称能源生产的终极手段。核聚变是太阳燃烧的动力，如果人类能够在地球上掌控这种能量，将有望引发一场清洁能源革命。

## » 保持托卡马克装置的最佳状态

托卡马克设计依靠磁场限制热等离子体，具有很高的可行性。等离子体是一种电离气体，它由正离子和自由电子组成，近似电中性。通常情况下，等离子体是在低压下产生的。

托卡马克聚变装置使用一系列磁线圈，在环形腔室内产生等离子体，并使之在装置内稳定(图1)。然后，使用外部加热系统将等离子体加热到摄氏1.5亿度的极高温，以实现核聚变。

在美国圣地亚哥，通用原子能公司(General Atomics, 简称GA)代表美国能源部运行DIII-D国家聚变设施，为

推动实现磁约束聚变而持续努力。作为一座面向用户开放的设施，DIII-D托卡马克接待了650多位来自世界各地的研究人员在此进行最前沿的聚变研究。

DIII-D托卡马克运行小组使用多物理场仿真优化操作流程和诊断设备，确保整个设施处于最佳运行状态。DIII-D托卡马克首席操作员，通用原子能公司的Humberto Torreblanca指出：“得益于COMSOL Multiphysics®软件，我们无需再使用简化模型进行工程分析，也不必假设所处理的问题是理想化的场景。我们可以研究托卡马克的复杂几何形状，并构建出一系列复杂的多物理场模型。”

“因此，我们可以设计并推进我们的构想，而不会损坏设备。仿真能够提供非常准确的结果，让我们不必依赖于简化的假设进行计算。”Torreblanca补充道。

以前，运行团队虽然已经能够分析DIII-D托卡马克的内部磁场，但还是不得不简化磁场来分析外部磁场(图2)。Torreblanca解释说：“托卡马克被许多组件和系统所环

绕，磁场产生的各种力和电流可能会影响和损坏这些系统。仿真分析有助于避免潜在损害以及研究项目延误所引起的高昂代价。”

Torreblanca使用COMSOL软件中的LiveLink™ for SOLIDWORKS®模块导入托卡马克几何结构，以研究托卡马克外部特定位置上的磁场，并观察磁场对特定系统的影响。

Torreblanca指出：“这个模型很容易建立，为我节省了很多时间，从而取代了以前那些耗时的方法。”

静态、缓慢或快速变化的磁场曾经损坏过托卡马克的一些真空涡轮泵，而这些泵对托卡马克上的主系统和子系统都至关重要。通过多物理场仿真，该小组

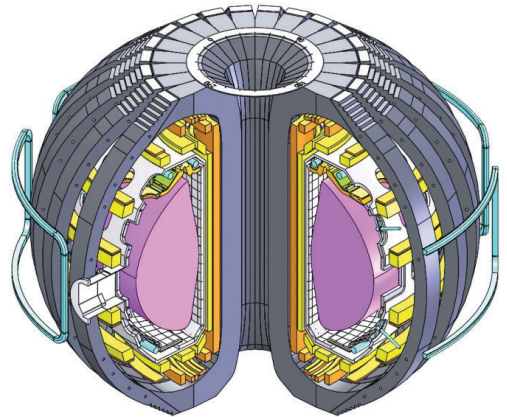


图1. DIII-D托卡马克核聚变装置内部视图。

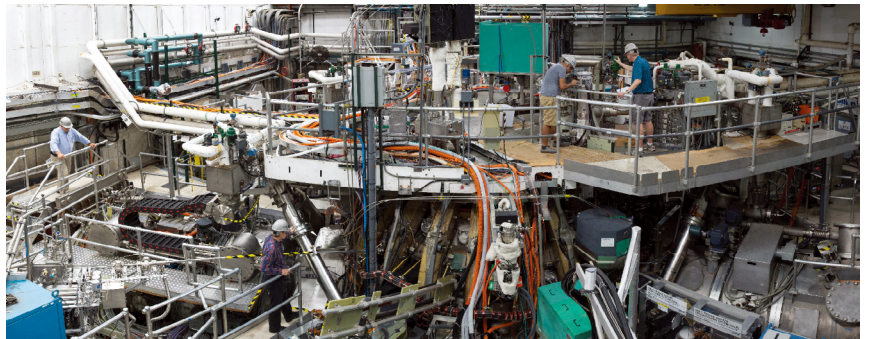


图2. DIII-D托卡马克装置被暴露在强磁场中的复杂系统和组件所包围。



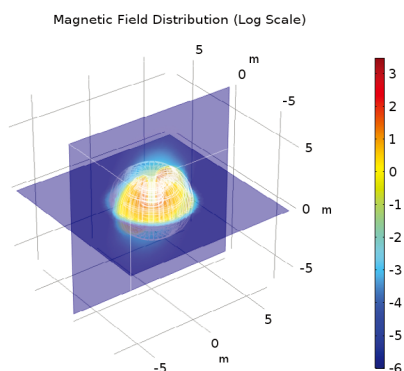


图 3. 托卡马克容器内外磁场分布的仿真结果。图注: Magnetic Field Distribution(Log Scale) - 磁场分布(对数标度)

显著改进了托卡马克容器外部的时变磁场分布分析,从而找到泵的最佳安装位置,提高了系统可靠性(图 3)。

## » 螺旋天线成就人造太阳

为了实现核聚变, DIII-D 托卡马克装置需要达到比太阳核心温度高 10 倍的温度。为了实现这一目标,目前的托卡马克装置采用了两个系统(图 4):中性束系统和电子-回旋加热系统。20 兆瓦能量的高能氦原子被注入到中性束系统中,而在回旋加热系统中,回旋管被注入了高达 4 兆瓦的微波能量以加热电子。一种新型的加热系统(图 5)正在设计与建造中,该系统采用了能注入 1 兆瓦的射频能量的螺旋天线。

多物理场仿真成为了优化螺旋天线设计的基础。DIII-D 将是第一台以兆瓦级功率使用这种天线的托卡马克装置,同时它能够将射频能量耦合到等离子体,并通过专门的代码来驱动电流并加热等离子体以达到预期效果。

螺旋天线由包含 2 个端模块和 28 个中心模块的 1.7 米阵列构成。能量可以通过直接连接到端模块的两条带状线从天线的任意一端注入,然后依次感

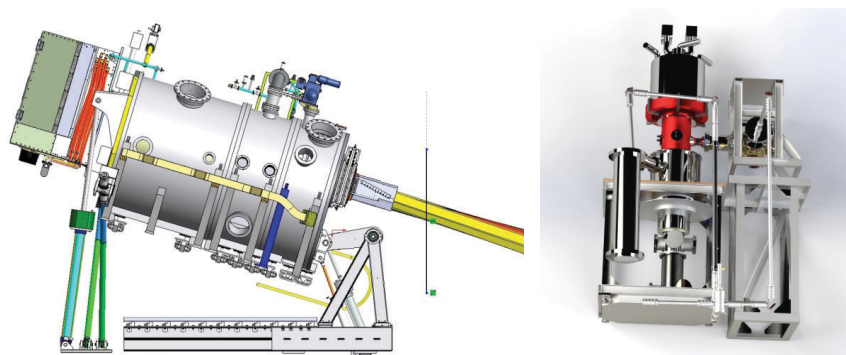


图 4. 当前 DIII-D 装置外部加热系统:中性束(左)和回旋管(右)。

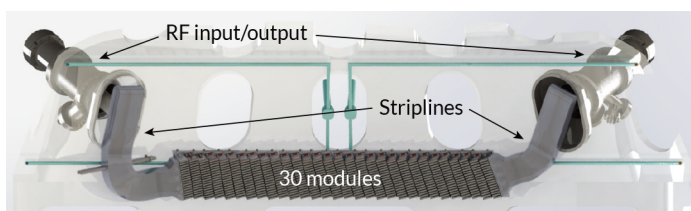


图 5. DIII-D 托卡马克装置上的螺旋天线。

应耦合到每个无源中心模块。DIII-D 中的等离子体可持续长达 10 秒,脉冲间隔为 10 到 15 分钟,为系统冷却到室温提供了充足的时间。天线的设计遵循相同的运行周期。

Torreblanca 解释说:“多物理场仿真赋予我们尝试新材料的能力,并让我们清晰地了解哪种材料可以提供最好的结果。天线需要能经受由等离子体干扰所引起的强电磁力,因为这会在天线内产生强大的电流。为了减小这种电流,天线需要采用低电导率的材料,但同时又要求材料具备很高的热传导率,才能消散天线因暴露于等离子体而承受的高温。混合了铬锆铜(CuCrZr)和因康镍合金(Inconel)的设计为我们提供了两类材料最佳的综合优势。仿真则使我们的工作变得更容易,因为我们只需点击电脑屏幕,就能查看使用多种不同材料的性能表现。”

Torreblanca 认为:“计算天线的

电磁场并将其可视化并不困难。我们可以耦合电磁场分析与传热,模拟射频损耗分布,从而得到热点分布图。这可以帮助我们进一步完善天线的设计。”

天线在其谐振频率(476MHz)下被激励,而通用原子能的团队则需要知道温度对这一频率的影响。Torreblanca 说:“我们需要了解天线谐振频率是否会随温度的变化而发生漂移,这样我们就可以通过天线设计或工作参数对其进行补偿,以便让天线能稳定地工作 10 秒。”

“多物理场仿真帮助我们模拟了一系列物理场景中的温度分布。这意味着,我们可以计算出能否在不损坏天线的情况下使用 10 秒钟,或者我们可以计算天线是否能工作几秒钟,并且还能驱动电流并加热等离子体,”Torreblanca 补充道。

## » 小实验,大见解

DIII-D 小组建造出了关键天线组

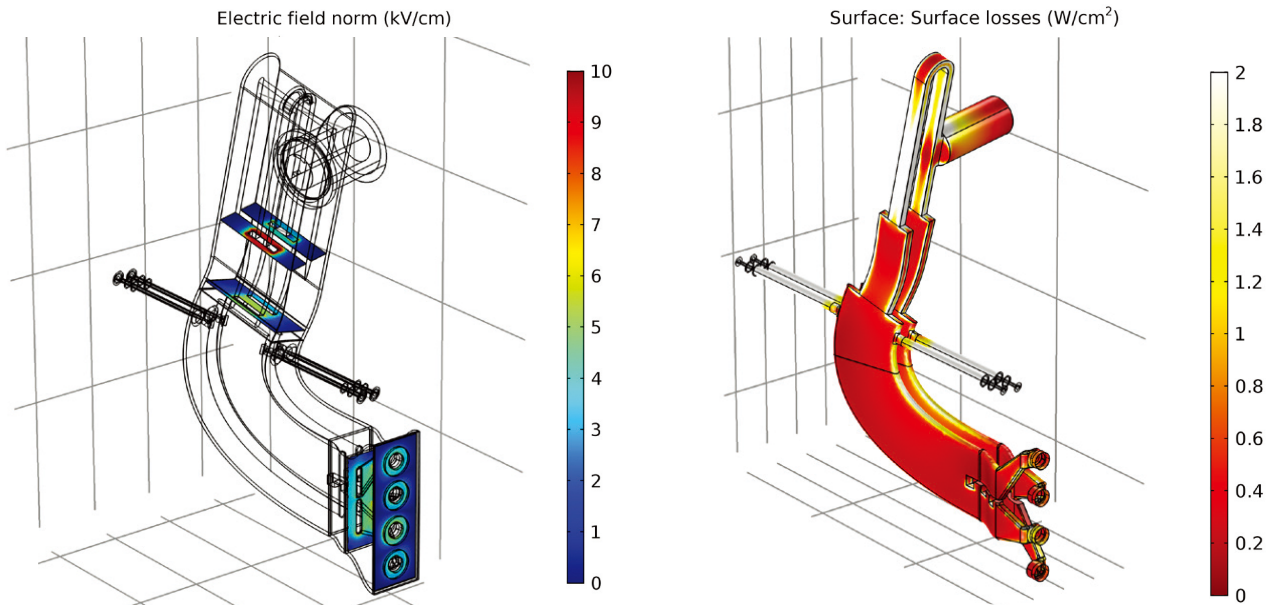


图 6. 天线上带状线的电场分布(左)和射频损耗(右)。

件的等比缩小测试模型。通过与多物理场仿真相结合,在建造全尺寸天线组件之前,该小组能够对这些组件的参数和条件进行先行测试。测试包含四分之一比例模型,以及用于还原全尺寸天线模块及其带状线电场值的 RF 谐振器外壳,以查明电弧或次级发射倍增现象是否会对系统产生不利影响(图 6)。“我们正在验证这些天线组件的等比例缩小模型。目前仿真与实验结果良好吻合,这让我们对天线的参数和几何结构的设计更有信心了。” Torreblanca 说道。

“通过仿真得到的见解总是很有启发性。对物理场的运作方式和仿真结果的研究,加深了我们对设计和装置性能的理解。我们有信心该系统将按照预期的方式工作。” Torreblanca 补充道。

DIHI-D 研究项目是全球开发可行核聚变装置的关键环节。在很大程度上,这应归功于各机构之间的高度协作,以及仿真和建模带来的便利。

Torreblanca 总结道:“我们正致力于解决全球能源问题。如果我们能利用 COMSOL 软件及时取得有益的结

果,那将意味着我们朝实现核聚变又迈进了一大步。”

#### 鸣谢:

本文涉及的工作材料由美国能源部(DOE)、科学办公室、聚变能源科学办公室资助。工作中使用了 DOE 办公室科学用户设施之一——DIHI-D 国家聚变设施所完成的工作,资助编号 DE-FC02-04ER54698。

#### 免责声明:

本报告由一家美国政府机构赞助编写。美国政府及其所属任何机构或任何雇员,均未以任何明示或暗示的方式,对所披露的任何信息、设备、产品或过程的准确性、完整性或实用性进行任何担保,或承担任何法律责任或义务,或表明其使用不会侵犯私人拥有的权利。本文中以商品名称、商标、制造商或其它方式指代的任何特定的商业产品、工艺或服务,并不一定意味或暗示美国政府或其任何机构的认可、推荐或偏好。本文作者所表达的观点和意见不一定阐述或反映美国政府或其任何机构的观点和意见。

“得益于 COMSOL Multiphysics® 软件,我们无需再使用简化模型进行工程分析,也不必假设所处理的问题是理想化的场景。我们可以研究托卡马克的复杂几何形状,并构建出一系列复杂的多物理场模型。

——Humberto Torreblanca, 通用原子能公司 DIHI-D 托卡马克装置首席操作员



# 仿真促进微流体细胞分选器的发展

英国剑桥 TTP 的研究人员用多物理场仿真成功发明了可用于治疗癌症的全新细胞分选设备。

作者 **GEMMA CHURCH**

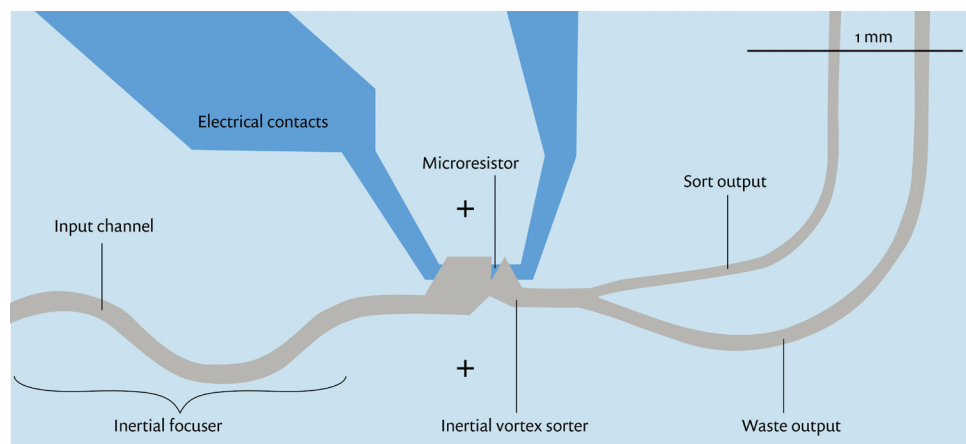


图 1. 旋涡驱动细胞分选器的构造和组件。图注: Input channel – 输入通道; Inertial focuser – 惯性聚焦器; Electrical contacts – 电接触区; Microresistor – 微电阻; Inertial vortex sorter – 惯性旋涡分选器; Sort output – 分离输出; Waste output – 废物输出

位于英国剑桥的 TTP (The Technology Partnership) 集团的研究人员发明了一种全新的细胞分选设备, 可以使细胞疗法实现自动化, 以此治疗包括癌症在内的一系列疾病。这种设备在基础研究、疾病诊断和生物工艺中也有诸多应用。

目前的细胞分选系统将生物学研究中具有不同行为的特殊细胞或细胞亚群分离出来。然而, 这种技术并没有得到很好的临床应用。TTP 的生命科学顾问 Robyn Pritchard 说: “虽然越来越发达的细胞分离技术为细胞疗法带来了许多激动人心的进展, 然而现有的技术尚不能满足细胞疗法的要求。”

传统的细胞分离方法称为空气喷流分离, 又被称作荧光激活细胞分离技术 (Fluorescence-Activated Cell Sorting, 简称 FACS)。该方法首先用激光一个个地测量细胞, 然后使其以液滴的形式穿过空气, 在高压电极的作用下, 不同细胞的飞行轨迹会发生偏移, 从而达到分离的目的。商用的空

VACS)。这种技术与空气喷流分离类似, 细胞先被荧光标记, 然后再实时进行分离。

VACS 使用一个输入通道引入细胞, 然后使用新型的几何结构将它们分两个通道输出, 一个通道输出需要的细胞, 另一个输出废弃的细胞(图 1)。

这种新型的分选设备可以解决现有技术存在的许多问题, 如 Pritchard 所说:

“对于细胞治疗来说, 最主要的难点在于细胞的分选速度。包括空气喷流分离在内的任何单束分选设备都有一个速度极限, 超过这个极限就会引起细胞死亡。为了加快速度, 就需要使用多通路技术: 并行处理多路细胞的分选。为了在进行多路细胞分选时不增加测量和控制系统的复杂程度, 最好的办法就是减小单个细胞分选器的尺寸, 这样, 在显微镜下就能观察到足够多的细胞。我们的团队正试图在一个小时内处理大约五十万个血细胞, 同时保证高纯度; 这相当于传统细胞分选技术的 10 到 20 倍的速度。”

Pritchard 补充说: “提升速度面临的最大挑战是制造出小得多的细胞分选器, 并确保分选速度和传统的细胞分选器相当。”

VACS 将会是一个更加安全的选择, 因为它全封闭,

气喷流分离系统并不适用于治疗, 因为分离的速度太慢, 需要高超的操作技术。在这个过程中, 病人和操作者都面临着细菌污染的风险, 因为细胞在液体处理和液滴产生过程中随时面临着病原体的威胁。

## 超越空气喷流分离的技术: 旋涡细胞分选器

TTP 发明了一种新的微流体细胞分离技术, 即旋涡细胞分选器 (Vortex-Actuated Cell Sorter, 简称

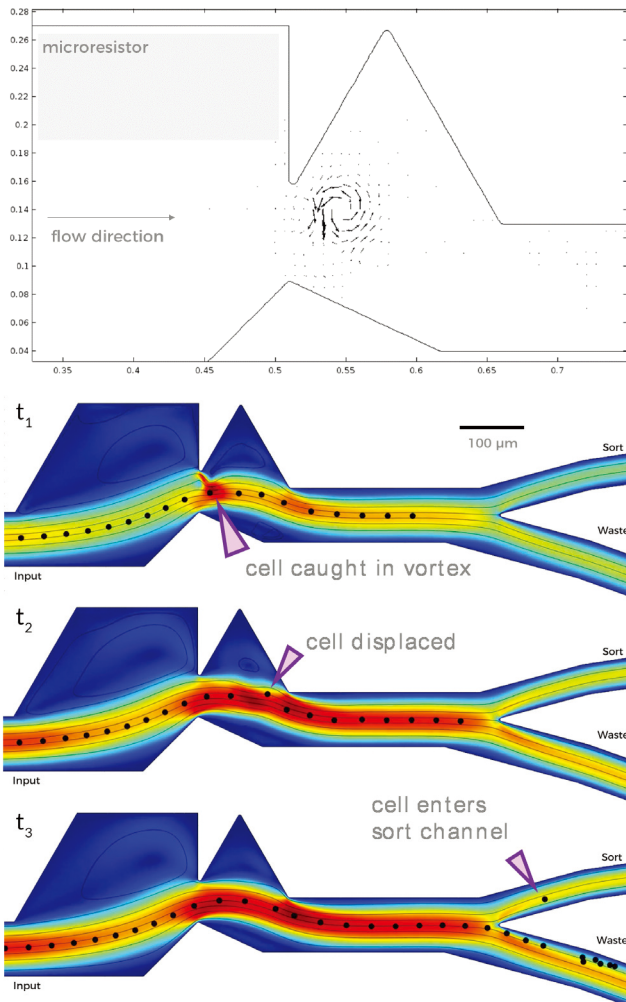


图 2. VACS 设备工作的仿真结果。图中显示了产生热蒸汽气泡的微型电阻驱动器的位置和仿真生成的旋涡的矢量图(上)。下方的三张时间切片图分别显示了细胞陷入旋涡,随后在流线方向发生位移,以及在最终进入分选通道之前的情况图注: microresistor - 微电阻; flow direction - 流向; cell caught in vortex - 涡流中的细胞; cell displaced - 偏移的细胞; cell enters sort channel - 细胞进入分选通道。

不会像空气喷流系统那样产生有害气溶胶。新型分选设备是一次性装置,这就减少了污染,降低了样品间交叉污染的风险。况且这套分选设备很实用,便携性好,容易操作,性价比高,是一款符合 GMP 标准的细胞治疗产品。

### » 体积小,速度快

包含驱动器在内,VACS 设备长约 1 mm,宽约 0.25 mm,并且可以在芯片上形成间距约 1 mm 的阵列,所有的通道均

包含在内。Pritchard 说:“我们相信这一的设计是全世界最小巧的高速细胞分选器。”

“团队首先筛选出尺寸足够小、能够放入 VACS 设备的驱动器。值得注意的是,是一款可以产生热蒸汽气泡的薄膜微型加热器,这种设备足够小(大约 0.1 mm 宽),并且易于制造。然而实验和 COMSOL Multiphysics® 的仿真结果很快表明以上驱动器都太快,力量太弱,无法移动细胞。”

Pritchard 说:“之后我们突然有了灵感:如果我们利用惯性微流体帮助驱动器增加位移是否行得通呢?”通过惯性在很小的尺度上操纵细胞,这在目前是一个热门研究领域。“我们假设如果可以用驱动器产生很小的旋涡,旋涡可以带着需要分离的细胞向下流动,细胞就会在旋涡的作用下逐渐从废弃液流移动到分选的液流中。就这样,VACS 诞生了。”

### » 用多物理场仿真解决问题

“要是没有多物理场仿真,设计 VACS 几乎是不可

想象的。”Pritchard 说,那些微流体效应和日常生活的经验相差甚远。直到最近,人们才意识到惯性在微流体设备中的重要作用。此外,设备的每一次迭代和测试都需要花费大量的资金和时间。

多物理场仿真在设计概念设想阶段提供了帮助。借助流体动力学模型,TTP 团队将热蒸汽气泡的扩张和破裂用“移动壁技术”模拟了仿真结果很快表明以上驱动器都太快,力量太弱,无法移动气泡变化。

Pritchard 说:“我们模拟了气泡边缘和 10 微秒的热蒸汽气泡扩张再破裂的影响,而不需要考虑气泡产生的大幅形变所涉及的复杂物理过程。有了这种全新的建模方式,我们可以对 20 到 30 个设计方案进行快速评估,得到我们想要的惯性旋涡的概念,这样我们就可以信心十足地建造真实设备。”经过多轮仿真迭代后,原型机终于按照既定设计运行。

在 VACS 中,每当一个需要的细胞被识别出之后,驱动器就会产生一个热蒸汽气泡。这个气泡会在 10 微秒

“如果没有仿真和建模工具,我们不可能实现如此快速、高效的开发进程。”

——ROBYN PRITCHARD, TTP 生命科学顾问



内先膨胀再破裂，产生一个惯性旋涡。惯性旋涡会移动大约 200 微米的距离，使细胞从原有的位置偏移 20 微米左右。接下来细胞移动到另一侧通道并被收集起来，而其他所有细胞都会自动流入废弃通道。图 3 展示了这两种细胞的运动轨迹。

### » 验证最终产品

团队同时也使用多物理场来确定最终的设计。Pritchard 解释说：“在芯片制造的初期阶段，我们面临着各种各样的问题，而仿真通常是发现和解决问题的最有效手段。产品在微加工过程中，有几个关键特征的质量与设计有出入，我们用仿真改进了设计，这样一来，我们就能用现有的功能特性实现所需性能。”

TTP 团队现在正在制造多路芯片（图 4），他们用多物理场仿真来测试芯片在不同方面的性质。Pritchard 说：“我们现在有 16 个输入通道和 16 个独立的分选器，正在进行的工作就是要研究这个高度复杂的微流体系统，确保每个通道中流体的流量相同。”

团队预计单通道惯性旋涡分选器很快就可以投入市面销售，再过一段时间，多通道的设备也可以上市。Pritchard 说：“我们希

望几个月后设计出多通道的设备，之后尽快设计出整个机器，以此证明这项技术可行。如果没有仿真和建模工具，我们不可能实现如此快速、高效的开发进程。”

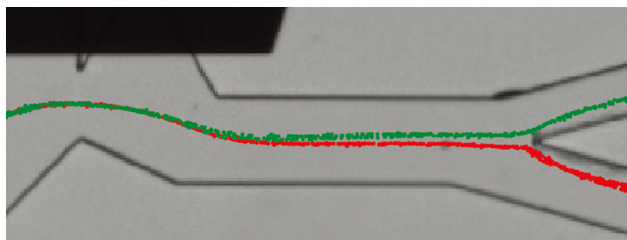


图 3. VACS 中的细胞被选中 (绿色) 和被废弃 (红色) 的轨迹。

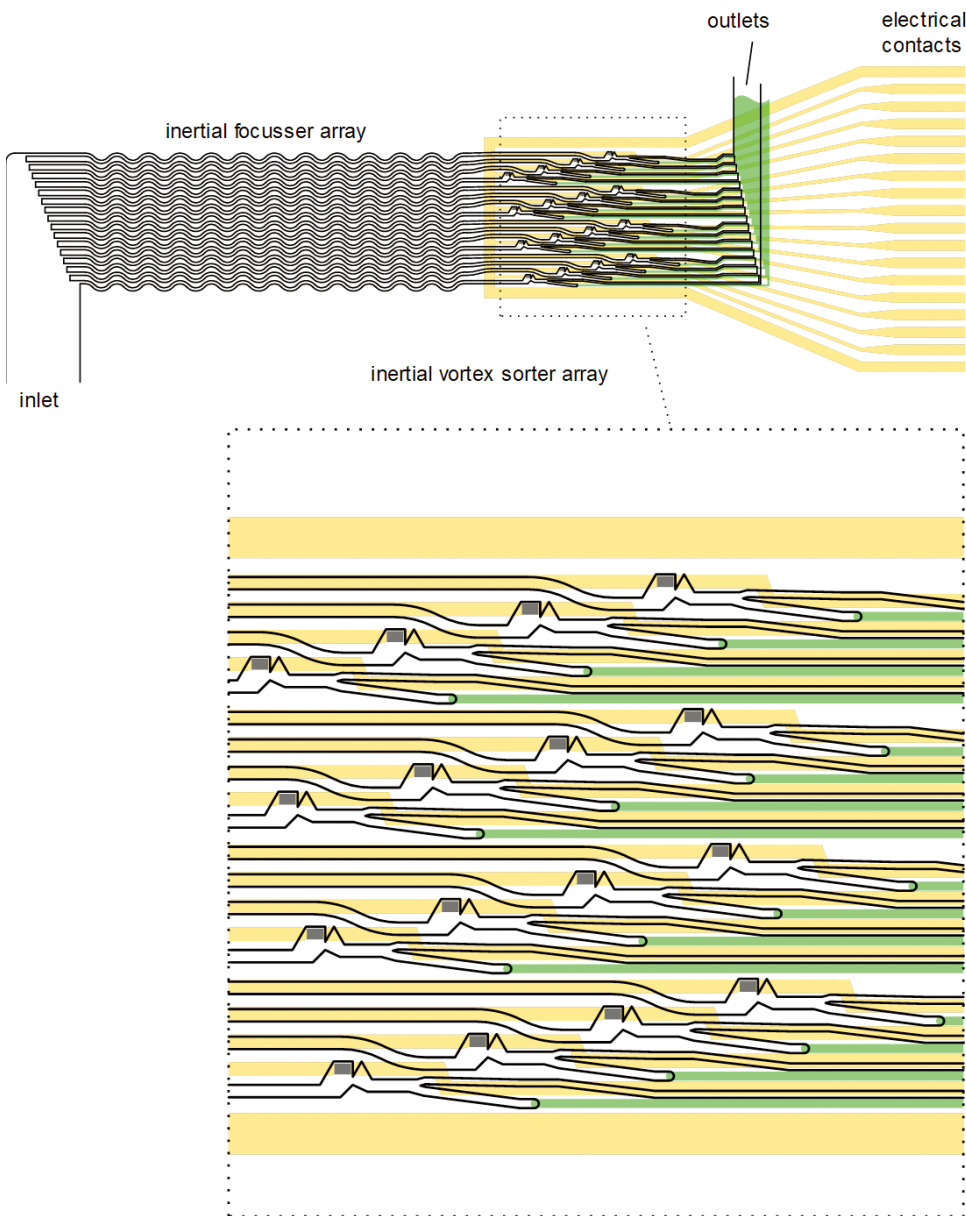


图 4. 有 16 个输入通道和 16 个分选器的惯性旋涡分选器。图注：inlet – 入口；inertial focuser array – 惯性聚焦器阵列；inertial vortex – 惯性旋涡；outlets – 出口；electrical contacts – 电接触区

## 仿真 App 助力电网的运行与维护

武汉南瑞集团的工程师们基于多物理场仿真模型定制开发出“电缆线路状态分析专家系统”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 ZHANG QIQI

电线电缆被誉为国民经济的“血管”与“神经”，是电力基础设施建设、智能电网以及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。电缆系统设备的日常维护是保证居民生活和工业生产正常运行的重要手段，而电缆出现故障后如何及时修复，也成为亟待解决的问题。

为了防止突然断电等情况的发生，电力设备需要定期借助红外、紫外和局部放电等检测设备进行状态评估。然而，定期“健康检测”往往

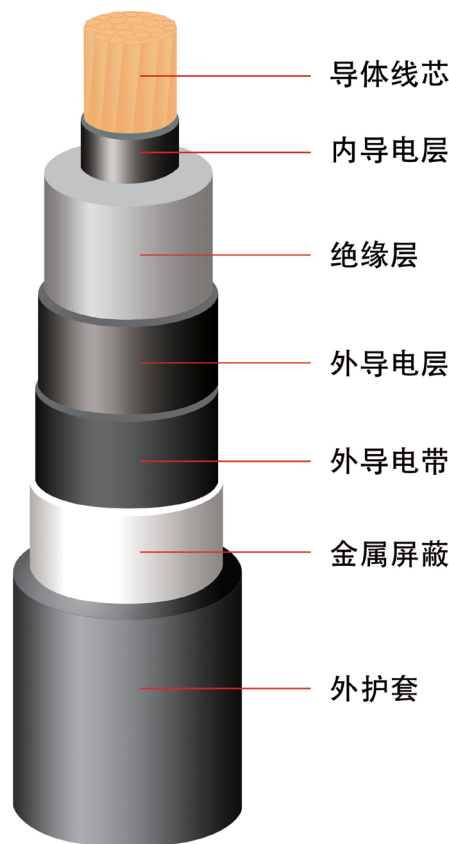


图 1. 典型的电缆结构示意图。



图 2. 左：电缆绝缘层在水分和电场同时作用下而产生的水树现象；右：绝缘层的机械损伤。



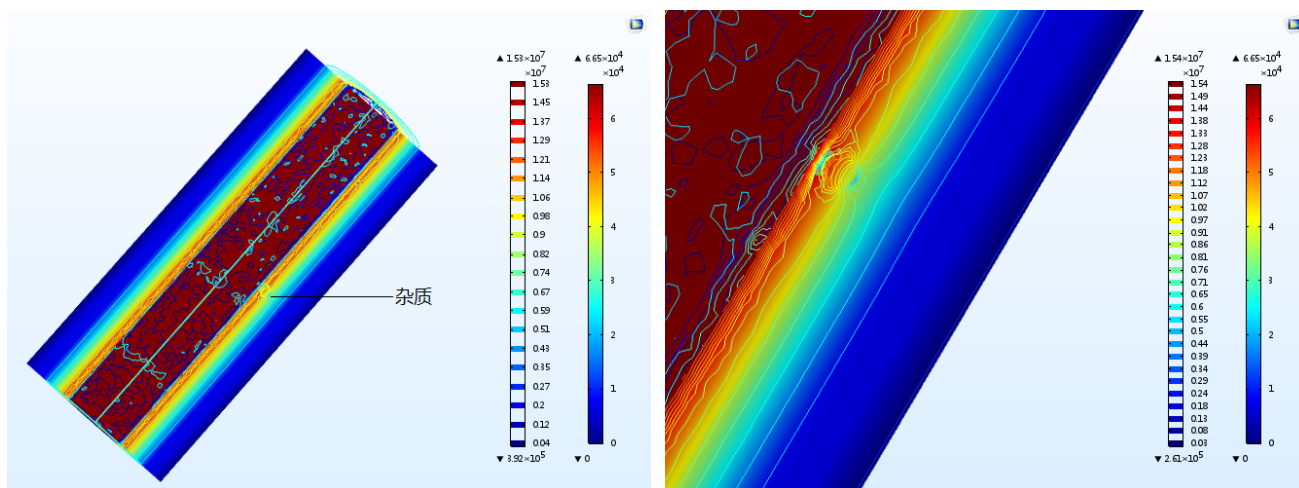


图 3. 左:内含杂质的电缆仿真结果显示电势分布图及电场模等值线。右:电场的局部放大图。

难以全面地反映电缆的状态或判断电缆设备的故障类型;更何况电缆的架设环境各异,例如埋于地下或隧道内,或是架设在空中,都会增加检测的难度。

### » 仿真助力提升电缆健康评估

为了维护电网的正常运转,除了使用传统的检测设备以外,工程师还需要考虑影响线缆健康的不同因素,如线缆本身的结构和材料、线缆中的杂质、电压波动及运行环境等。

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家研究机构,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许多相关参数与物理现象,有效地分析不同因素引起的电场变化。

### » 影响电缆健康的水树现象

电缆是一个复杂的多层结构,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树状的微型通道。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,导致绝缘层发生机械损伤,从而扩大绝缘体的缺陷。在电力输

送中,所谓的“水树”现象是诱发高压电缆损坏的主要因素(图2)。

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® 软件创建了一个电缆模型。“COMSOL 软件界面友好,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。

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(介电常数和电导率),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。“在评估电缆健康状况时,电缆各层的材料属性、水树和电缆中的杂质等因素都需要考虑在内,而这些在 COMSOL 软件中很容易实现。”张静解释道。

将正常情况与存在缺陷的电场结果进行对比,工程师可以准确地评估杂质和水树对电缆性能的影响。正常电缆的电场仅涉及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

“仿真 App 在电缆维护工作中起到了关键作用,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, 武汉南瑞

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,电缆线绝缘层将会在短时间内被击穿。

## » 数字孪生模型助力维修一线

对于武汉南瑞的工程师而言,仿真全面揭示了电缆的状态特征。但是当电缆出现问题时,一线的故障检修人员缺少仿真技能培训,难以使用数字孪生多物理场模型基于实时数据分析故障原因。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。若一线的检修人员也能使用仿真分析故障原因,将大大降低检修工作的难度。为使仿真模型能够实时服务于一线人员,张静工程师基于多物理场仿真模型,使用COMSOL软件自带的“App开发者”,定制开发了专家系统仿真App(图4),检修人员只需修改几个参数就能完成仿真分析。

“电缆线路状态分析专家系统”仿真App(图4)支持用户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。App可以快速生成电势和电场报告,检修工人得以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。◎

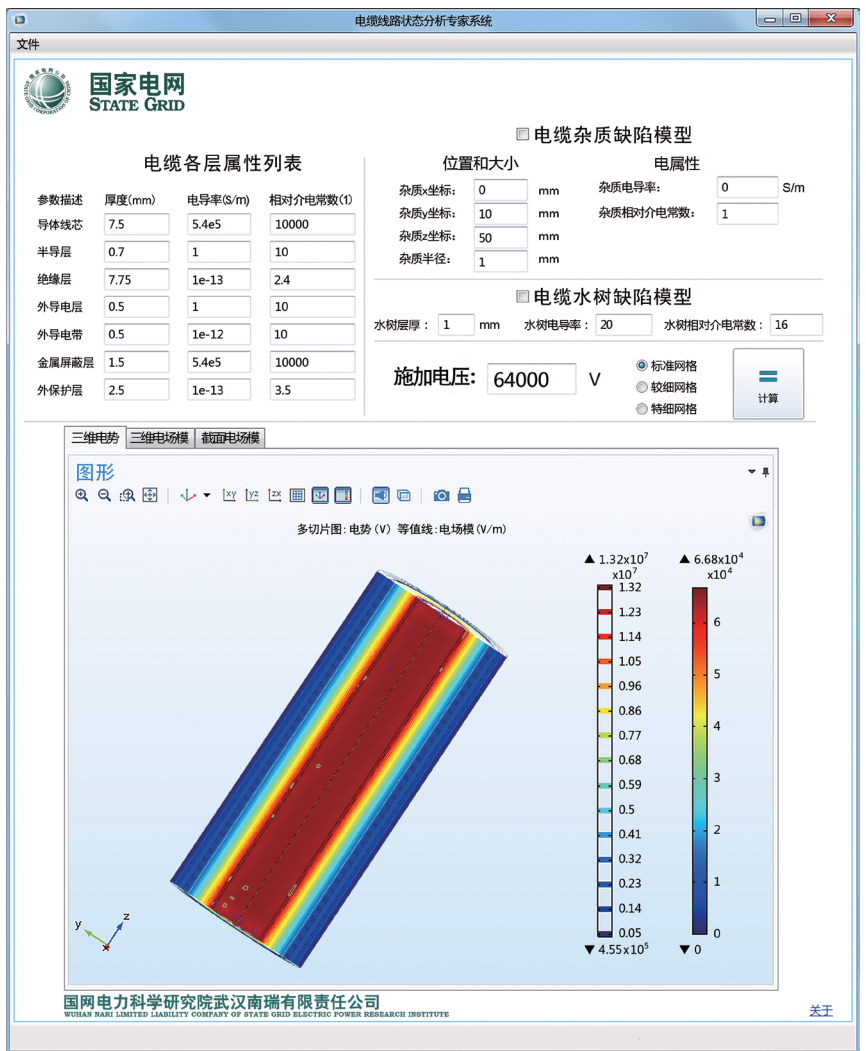
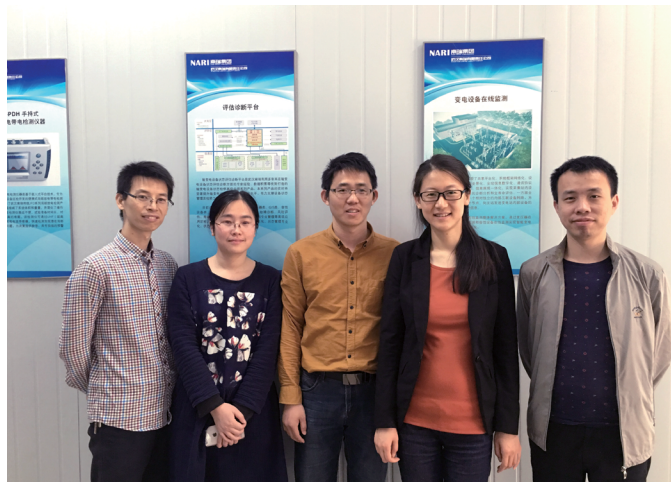


图4.“电缆线路状态分析专家系统”仿真App。



武汉南瑞运检服务事业部的仿真研究团队(从左到右):陈钊、胡婷、房体友、张静、汪浩。



# 使用多物理场仿真 揭示复杂材料特性

加拿大核实验室的研究人员利用多物理场仿真透彻地分析核燃料的复杂材料特性。

作者 SARAH FIELDS

当工程师们探索是否可能用多物理场仿真软件替代成熟但却繁琐的内部代码时，会遇到什么情况呢？在加拿大顶尖核科学技术组织——加拿大核实验室的计算技术分部（Canadian Nuclear Laboratories, 简称 CNL），核工程师们就这一问题展开了深入探索。

在致力于提高反应堆的安全性、效率和经济性的核工程领域，经常会采用成熟而稳定的内部计算机代码进行模拟研究。但不幸的是，即使对系统进行微小的调整，也必须梳理大量的代码才能探明调整对系统的潜在影响，这对创新构成了障碍。作为修改成熟代码和沿用代码的替代方案，多物理场仿真平台

提供了一个让工程师能在数据和建模方法方面进行探索的环境，从而省去了修订冗长代码的麻烦。

作为一名 CNL 的燃料安全科学家，Andrew Prudil 在使用仿真软件对存在已久且看似不可改变的核反应堆设计进行改进的研究中扮演着重要角色。

“从本质上讲，核科学就是材料科学，但需要考虑辐射的影响。” Prudil 解释说：“我们研究的材料包括核燃料，以及一些外围组件的成分。”

## 核燃料：复杂的材料科学问题

Prudil 利用多物理场仿真软件建立了一个仿真模型，内含数量惊人的物

理现象。他的模拟工作包括核燃料芯块描述，涵盖热量传输、结构变形、机械接触、裂变气体释放引起的压力累积，以及由于晶粒生长、辐射损伤和燃烧引起的微观结构变化以及核燃料外围包壳的特性。

在核反应堆中，原始核燃料芯块（图 1）被放置在包壳或密封金属管内。受到辐射时，这些燃料芯块温度升高，并将热量通过密封金属管传递给水。热水最终被用来产生蒸汽，进而发电，这一过程与常规发电厂的工艺流程一致。

在受到辐射时，裂变反应会在燃料芯块内产生热量，导致燃料芯块的高温、高热梯度和热膨胀。由于裂变产物聚集在燃料芯块中，因此还需在研究中考虑核反应特有的现象。

图 1 所示为核燃料芯块在经历持续高温运行后的复杂微观结构。最初形成的晶粒结构仅保持在外部最接近冷却剂处，因为这里的温度最低。在温度略高处，晶粒生长（粗化），形成等轴晶粒生长区。而在温度最高处，蒸汽的输送机制使燃料中的孔隙沿温度梯度（朝中心方向）迁移，形成中心空隙，并在其尾流中留下长柱状晶粒。

由于上述影响，陶瓷核燃料内部会出现裂纹。另一方面，陶瓷与金属包壳（用于包裹核燃料的金属层）之间存在接触，高能裂变产物（如伽马和中子辐射）会改变所有材料的微观结构，因此必须考虑辐射损伤。而裂变时原子一分为二，导致占据的空间更大，所以还存在宏观膨胀。

稀有气体氙和氪这两种裂变产物均为惰性，会在燃料芯块内部形成气泡（图 2）。

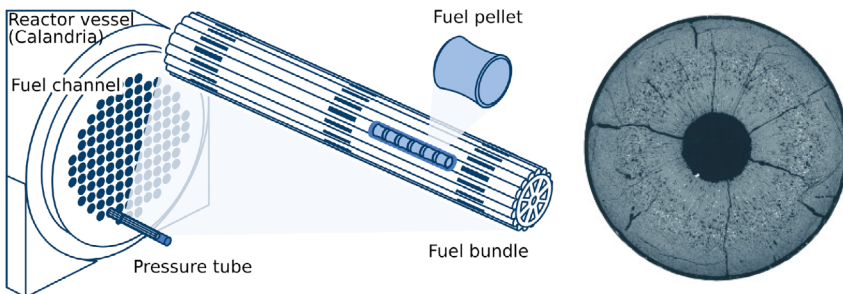


图 1. 左图显示燃料芯块在燃料棒束中的位置。右图为燃料芯块截面的显微照片，显示了在运行过程中产生的微观结构。图注：Reactor Vessel (Calandria) - 反应堆容器（排管式堆容器）；Fuel Channel - 燃料通道；Pressure tube - 压力管；Fuel pellet - 燃料芯块；Fuel bundle - 燃料棒束

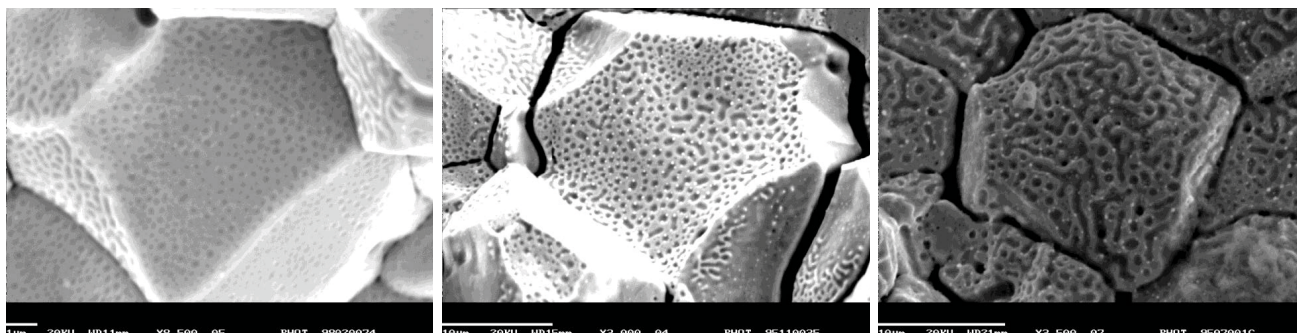


图 2. 显微照片显示了二氧化铀燃料晶界上裂变气泡的发展。随着燃耗的增加, 从左到右, 气泡变得越来越大, 并进一步相互连通。  
“Development of grain-face porosity in irradiated fuel”, J. Nuc. 2004 年, 第 325 卷

还有一些腐蚀问题也需加以考虑, 这是因为辐射环境中的高温水会促使辐射分解产物的形成, 进而腐蚀包壳外部。

### » 防止核燃料失效

由于核燃料芯块的特性会随着辐射发生显著变化, 因此工程师们在很大程度上需要依靠模型在实验结果之间进行插值处理, 以预测燃料的性能参数, 如峰值温度、气体压力和包壳应变等。类似地, 想要知道在辐射环境中会如何显现各种设计变化, 也需要大量模拟并通过实际测量加以验证。

Prudil 研究的主要目标之一是模拟及预测包壳的应变, 因为包壳的变形是燃料失效的重要原因。一旦建立起包壳应变模型, 就可以在计算机上优化系统。优化策略包括直接改变燃料、包壳与燃料的间隙、或燃料进入反应堆后的处理方式。

Prudil 表示: “建立模型相对简单, 但是要为模型赋予正确的材料属性就不那么容易了, 尤其是这些属性会随时间及辐射强度变化。”完成一个新模型后, 他会比较模拟结果与实验结果, 以评估模型的预测能力。

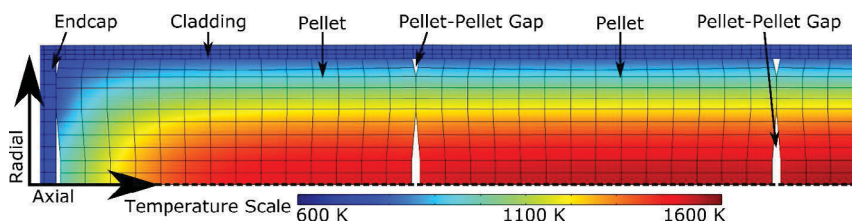


图 3. “燃料和包壳建模工具 (FAST)” 的仿真结果显示了整个包壳、燃料芯块及芯块-芯块间隙的温度。图注: Endcap - 端盖; Cladding - 包壳; Pellet - 芯块; Pellet-Pellet Gap - 芯块-芯块间隙; Radial - 径向; Axial - 轴向; Temperature Scale - 温标

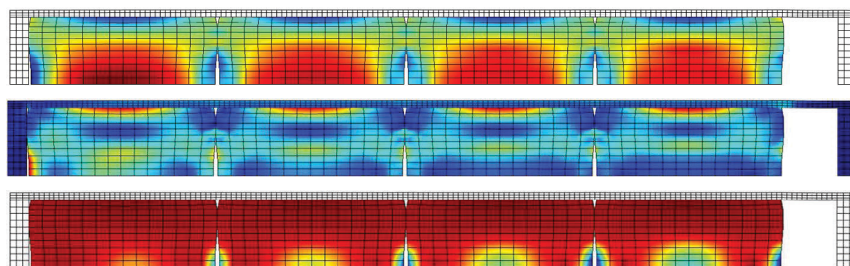


图 4. FAST 的仿真结果显示了整个包壳、燃料芯块以及芯块-芯块间隙中的静水压力(上)、von Mises 应力(中)和轴向蠕变(下)。

更换燃料本身是一种极具吸引力的核反应堆改进方法, 因为核燃料本来就是设计为可更换的。由于无需更换任何反应堆零件, 所以这种方法比较节省成本: 工程师只需在反应堆需要燃料时为系统提供新的燃料。

“我们面临的最大挑战是准确地描述所研究的材料。” Prudil 指出。

### » 在一个模型中耦合多种物理现象

Prudil 使用 COMSOL Multiphysics® 软件创建了模拟燃料和包壳的模型(简称 FAST), 以捕获核燃料、包壳以及两者间隙的复杂热传输、固体力学和材料特性。图 3 显示了芯块与包壳由于核反应所产生的温度分布。

Prudil 指出: “使用 COMSOL® 软件, 不必过多关注数值方法和编程, 以



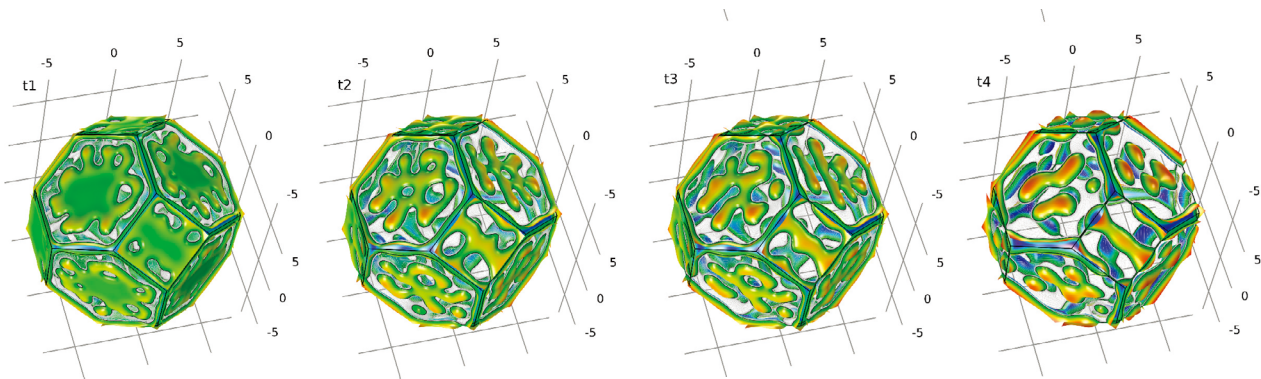


图 5. 从左至右, 对晶界上气泡形成、运动和聚结的仿真结果。

及求解过程和后处理, 我可以直接着手处理数学和物理相关的问题。与采用内部代码进行数值模拟相比, 使用 COMSOL 软件的相关费用更低、效率更高。”

Prudil 还从 FAST 模型中获得了静水压力、von Mises 应力以及贯穿包壳和燃料芯块的轴向蠕变(图 4)等仿真结果。这些物理场的分布包含了各项设计参数(如长径比和腔室尺寸)以及运行因素(如功率水平和冷却剂温度)的影响。

### » 晶界孔隙演化模拟

为了以不同方式扩展模拟工具并揭示反应堆的性能, 利用 COMSOL® 提供的基于方程建模的功能, Prudil 模拟了从燃料晶粒向外的气体扩散, 以及随后晶粒边界上气泡的形成和运动(图 5)。

当核燃料承受辐射并发生化学变化时, 气体从燃料晶粒中渗出并形成气泡。然后, 这些气泡四处移动、合并(图 5)。在传统的相场分析中会模拟燃料晶粒的体积。本文所述技术的新颖和强大之处在于仿真中忽略了固体, 而只模拟固体和气体之间的运动表面。这样就可以将三维问题转化为二维问题, 从而显著减少了所需的计算资源。

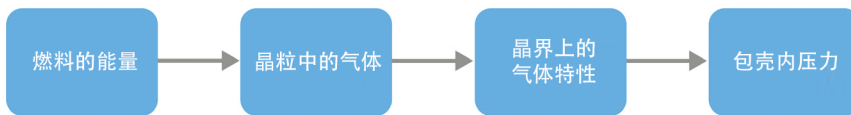


图 6. 燃料的降解过程。

模型中在晶粒表面耦合了两个弱形式方程, 一个与到气泡表面的距离相关, 另一个则与化学势相关。只要知道从燃料中排出的气体量, 该方法就可以计算燃料单元内部的导热系数和气体压力。这一分析得出的结果让 Prudil 能够确定燃料特性的其他关键指标。这些计算结果被用于燃料退化的非线性描述(图 6)。

根据仿真结果可知, 如果压力足够低则有可能获得最大利用率, 这样燃料可以继续承受辐射, 这是一项对系统安全具有重大影响的发现。

### » 仿真驱动燃料技术创新

通过使用多物理场仿真, CNL 的工程师们能够创建有用的工具, 并为加快设计的迭代和创新开辟道路。Prudil 认为多物理场仿真展现了核工程在其他领域的发展前景, 如事故容错燃料的开发。工程师们对设计能够抵抗严重事故的燃料产生了兴趣, 这为他们重新思考

燃料创造了机会。

从长远来看, Prudil 注意到仿真软件在小型模块反应堆开发中的作用, 这代表核反应堆设计向更小型、更便于建造的方向转变, 并有可能降低反应堆高昂的建造投资。小型模块反应堆可采用新材料制成, 并具有新的几何形状和安全模式, 这扭转了数十年来核反应堆日益增大的趋势。

同时, Prudil 创建的对现有反应堆的综合表述, 将继续为人们深入了解核反应堆多层次的复杂性提供宝贵的见解。☉



Andrew Prudil, CNL 的燃料安全科学家。

## 向边界元法致敬

丹麦瑞声达公司的工程师采用声学边界元法创建了头部和躯干模拟器的仿真模型。这款模型成为了对耳机、免提通话装置及助听器等与人体相互作用的声学装置进行性能评估的关键工具。

作者 ZACK CONRAD

表征人体对通过空气传播的声音信号的影响并不是一项简单的任务。为了对受人体影响的声学装置的性能进行准确评估，我们必须直面这项挑战。原位电声测试是一种标准的评估方法，然而躯干、头部、耳廓和耳道形状不规则，并且因人而异，常常给声学工程师带来极大的困扰。

为了确保采集的声学数据尽可能准确，声音与振动测量设备制造商 Brüel & Kjær 开发出了头部和躯干模拟器 (Head and Torso Simulator, 简称 HATS)。这一模型可以准确地再现普通成人头部和躯干的几何结构与声学性能 (图 1)。此装置配有耳口模拟器，是对耳机、免提通话装置、助听器、头盔和听力保护器进行电声测试的理想选择。耳模拟器通常是一个与前置放大器相连的半英寸耳机，而口模拟器是一台高顺性扬声器，它通过声压分布来模拟普通成人讲话时的情况。

多年来，丹麦瑞声达 (GN Re-sound) 公司一直使用 HATS 作为测量装置，用于研究耳朵几何结构对耳膜感知声音的影响，并测定由耳朵和头部几何结构而产生的声散射的方向性特征。近期，他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件构建 HATS 的计算模

型。高级工程师 René Christensen 利用软件中的边界元法 (boundary element method, 简称 BEM) 功能完成了这项任务。模型完成后，许多同事都发现各自的研究均可以采用此仿真工具替代人体模型。

### » 为何选择边界元法？

躯干、头部、耳廓和耳道对空气传播声音信号以及头部周围声场的综合影响，被称之为头部相关传输函数。

“在远离头部的空间中指定一点，你可以描述该点发出的声音到耳膜的传输过程。” Christensen 解释道。这种确定性模拟方法可以对麦克风摆放在不同位置时产生的声音 (示例兴趣点见图 2) 进行可视化研究，由此协助工程师制定工程决策，并探索头部和躯体对总声压的影响 (图 3)。以米为量级的尺度下进行声学模拟的挑战在于，常用的有限元法 (finite element method, 简称

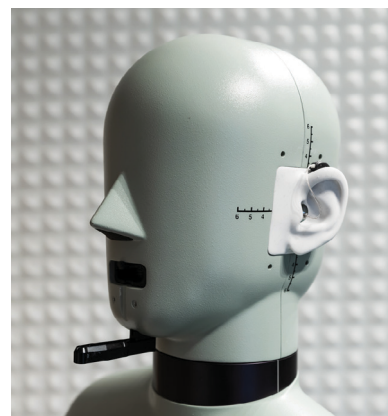


图 1. 使用 HATS (头和躯干模拟器) 测试集成式头盔系统。

FEM) 的计算量会很大并且占用大量内存。

对于在笔记本电脑上执行大部分模拟工作的 Christensen 而言，计算量与内存需求是一个严重的桎梏，但是 COMSOL Multiphysics® 软件让他能够随意选择适合的方法。针对这一案例，他可以充分利用软件中的声学边界元法，实现更为高效的模拟。虽然边界元法在每个自由度上的计算量超过了有限元法，但边界元法在大体积范围内实现相同的精度时，所需的自由度要比有限元法少很多。利用边界元法，可以在域内的任一点上提取声压值，而仅需对表面进行网格划分和计算。显而易见，这项功能具备实质性的计算优势。有限元法需要对整个体进行网格划分，更加适用于近场分析。通过使用

“这款软件对于像我这样试图通过非现有的数学方法来描述物理现象的人来说非常有用。我经常自问：‘你可以给出描述此问题的方程吗？’如果答案是肯定的，那就能够在 COMSOL 中建立并求解这个问题。”

——RENÉ CHRISTENSEN, 瑞声达高级工程师



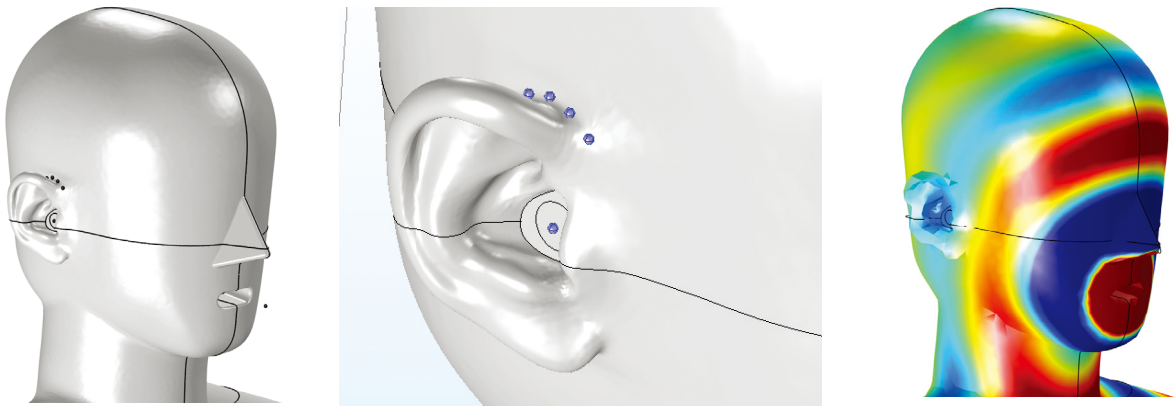


图 2. 左和中：“近耳”点，在这些位置计算了口对点的近耳传输函数，这是一种更具体的关于头部的传输函数。右：3200 Hz 频率下的声压分布。红色表示高正压，蓝色表示高负压。

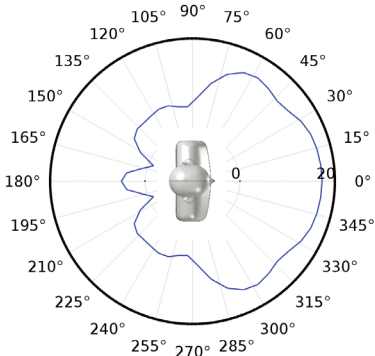


图 3. 3200 Hz 频率、1 m 半径的总声压极坐标图。

边界元法，Christensen 得以减少模拟的计算量，让笔记本电脑的计算资源足以应付此类仿真运算。“边界元法简单多了。” Christensen 评价道，“如果你拥有完整的几何结构，那就只需要创建表面网格，这种工作方法简直是一种享受。通常人们会使用体网格，他们不得不离散空气域，还得应用辐射条件来限制反射，但这些特征都已经包含在边界元法当中。”

### » 讲话与倾听

HATS 的优点在于，它可以模拟包含多个声源的环境。举例来说，用户在来访时的说话声，就像在忙碌的办公室中戴着耳机工作的职员说话时的情况

一样。而助听器中由于配置有麦克风和扬声器，复杂的结构可能会引起声反馈。“助听器中装有两个麦克风，而且它们均可感知声音和振动，这让问题更加复杂。” Christensen 解释道。“助听器产生的声反馈现象有时会造成令人难以忍受的噪音。”

因为边界元法需要极少的物理场设置，所以建模相对简单。在上述案例中，研究人员对口腔采用加速度边界条件以模拟扬声器。假设 HATS 自身表现为刚性，并且边界元法 (BEM) 可自动添加任何辐射条件，确保声波不会反射。基于上述条件，计算头部和躯干周围的声压场，运行仿真后可以通过后处理对多个麦克风位置进行研究。基于助听器的几何结构，机械设计师可以指出所有可行的位置，并且根据仿真结果推测最佳位置。“借助边界元法，我们确实不需要考虑过多物理场设置。” Christensen 说道，“因为我们感兴趣的是口与耳的关系，所以在口的位置施加了一个加速度条件，并在口的前方，或耳朵内部和表面上提取声压，仅此而已。我们需要关心的唯一物理场

就是声场。”

### » 未来的应用

Christensen 的 HATS 模型对于他和同事来说具有极高的价值，因为该模型一旦完成求解，就可以通过各种后处理工具提取海量的有用信息。他们可以对不同的配置（比如有助于助听器紧密贴合的拱形结构，以及连接内耳和外耳的端口）进行分析研究，针对各种位置推导出新的传输函数，也可以与其他软件搭配使用。

Christensen 还表示，他将继续使用 COMSOL Multiphysics® 改进他的声学模型，不仅仅是 HATS，他还将使用该软件研究各种振动声学问题。“我喜欢这款软件，因为它具有易于使用且直观的界面，还支持根据自己的需求添加或修改方程，我经常使用这项功能。”他评价道，“这款软件对于像我这样试图通过非现有的数学方法来描述物理现象的人来说非常有用。我经常自问：‘你可以给出描述此问题的方程吗？’如果答案是肯定的，那就能够在 COMSOL 中建立并求解这个问题。”

# 卓越设计源于自信

作者 DAN ANAGNOS, CHIEF TECHNOLOGY OFFICER, WARWICK AUDIO TECHNOLOGIES

多年以来,电声系统的研发人员一直在使用集总参数和分布元件建模等传统的仿真方法。虽然这些建模技术对某些应用是有效的,但它们在准确性和有效性方面往往并不理想。这些仿真方法的结果通常与测量结果的相关性较差,并且不能正确描述底层的机理,从而可能导致错误结论或设计缺陷。因此,在开发新颖、前沿的高保真音频技术时,更加全面、准确和高效的仿真技术变得至关重要。

在 Warwick 音频技术公司(Warwick Audio Technologies),我们不仅利用多物理场仿真技术显著缩短了设计周期、降低了原型机制造成本,而且能够在一系列工程应用中快速获取最优解决方案。两年前,我们与 COMSOL 认证咨询机构 Xi 工程咨询公司(Xi Engineering Consultants)合作,共同开发第一代高精度静电叠层(high-precision electrostatic laminate,简称 HPEL)换能器。在获得成功之后,我们继续与之合作开发第二代 HPEL 平面换能器,以及专用的电子驱动设备。这种新型设计显著提升了产品的性能,并能够灵活应用于不同大小、形状和功率级别的产品,满足从耳机到汽车音响系统等各种应用的需求。

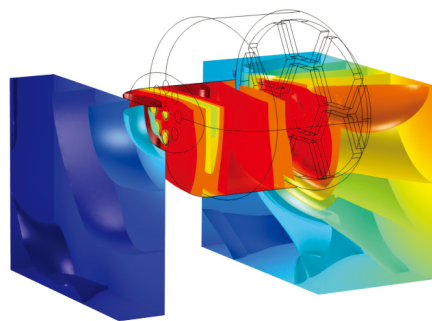
通过多物理场仿真,我们能在不同输入功率下准确地预测出 10Hz 至 60

kHz 频率范围内的声压级、灵敏度、线性度和各类失真。仿真技术使我们能够对不同几何形状和材料进行参数化分析,从而在制造原型机之前就能获得产品相关参数的优化设计。我们甚至能够在设计时纳入与产品加工相关的组装特征,并测定其对产品性能的影响。

我们还扩展了模拟的范围,以便将周围的声学环境纳入设计中。我们通过边界元法(BEM)和有限元法(FEM)的结合,确定了汽车头枕扬声器系统的材料和声学载荷条件的最优设计。此外,我们还依据整个车辆的特定位置,对传感器和电子装置进行了缩放和优化。

多物理场仿真在关键的研发工作中堪称一种强大且高效的工具,可以帮助我们节省时间、成本和资源,让我们摆脱了这些约束和限制,同时还能够降低研发过程中的风险。无论是稳定发展的公司还是像我们这种依靠风险投资建立的初创公司,都能在各个方面的多物理场仿真技术中获取便利。我们的投资

者很快就能看到令人信服的进展,并从迅速进入预期市场的优秀设计和产品中赢得收益。◎



汽车头枕中 HPEL 换能器的声压级等值面。



超高性能的 Sonoma 耳机系统,应用了 WAT 开发的 HPEL 换能器和完全集成的音频驱动电子设备。



Dan Anagnos 是 Warwick 音频技术公司(Warwick Audio Technologies, WAT)的首席技术官。WAT 公司是一家总部设在英国的科技企业,为高级音频应用开发最先进的静电平面换能器和专用电子驱动设备。在过去 30 年中, Dan 在多家公司负责管理消费电子、专业音频和 OEM 音频部门的电声研究和产品开发,并在电声领域拥有 14 项专利。