

# COMSOL NEWS

多物理场仿真杂志



## 当增材制造 遇见仿真预测

仿真 App 助力工厂运行的  
实时管理

P 8

# 创新者直面加剧的全球挑战

时代由何而定义？虽然 21 世纪 20 年代才刚刚开始，但我们已经见证了巨大的变化。气候变化正在重塑世界各地的生活，期间还伴随着意想不到的全球疫情大流行的危机。

一个时代仅仅是由它所面临的困难来定义的吗？历史告诉我们，如何克服困难也同样重要。在本期 COMSOL News 中，我们通过 9 个用户案例向大家介绍科技创新者如何在多物理场仿真的帮助下，加紧步伐迎接这个时代的挑战。

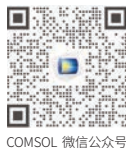
他们中的一些人正在研究气候变化带来的影响，AWI Institute 的团队通过黏弹性力学仿真预测了格陵兰冰川形状的改变。Exicom 和博世等公司的团队，正在推进电动汽车技术以减少全球对化石燃料的依赖。芬兰的初创公司 Polar Night Energy，通过构建一个巧妙的系统将太阳能产生的热量储存在由沙子制成的“电池”中。创新者还利用不同的新型技术应对生物医学和通信等领域面临的长期挑战。

所有这些研发者都致力于创造一个更光明的未来，他们正借助 COMSOL Multiphysics® 软件实现这一目标，即使是那些刚接触仿真的人也能够实际工作中受益于仿真。英国制造技术中心通过开发一款仿真 App 作为工厂设施的“数字孪生”原型，赋能一线工人优化增材制造工艺。

或许我们能从这些创新者身上汲取灵感，我们将铭记这个时代，不是因为它所遇到的挫折，而是因为它的进步以及创新者们为建设一个更美好的世界而采取的行动。

Alan Petrillo

COMSOL, Inc



COMSOL 微信公众号

参与 COMSOL 社区互动

COMSOL 博客 [www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs)

微信 COMSOL-China

微博 COMSOL 中国

我们期待您对本刊的意见和建议，欢迎通过 [info.cn@comsol.com](mailto:info.cn@comsol.com) 与我们联系。在线阅读更多用户案例请访问：[comsol.com/stories](http://comsol.com/stories)

© 2022 COMSOL 版权所有。COMSOL、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联，亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 [cn.comsol.com/trademarks](http://cn.comsol.com/trademarks)。

黏弹性模拟揭示  
冰川流动和冰层消融过程

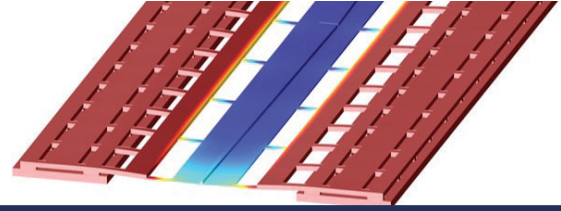
P 32

# 目录



## 设计优化

- 4 博世助力汽车行业迈向电气化未来  
Bosch, 德国
- 12 集总热仿真提升汽车电池管理系统的性能  
Exicom Tele-Systems, 印度
- 22 核磁共振检查中医疗器械的射频感应发热  
MED Institute, 美国



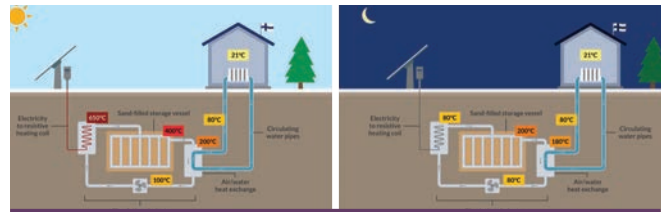
## 产品开发

- 15 借助仿真设计硅光子 MEMS 移相器  
EPFL, 瑞士
- 26 降解微污染物的新型污水处理设备  
Eden Tech, 法国
- 29 海底电缆设计的仿真优化  
Hellenic Cables, 希腊



## 仿真 App 应用

- 8 仿真 App 助力增材制造工厂的精准调控  
MTC, 英国



## 科研聚焦

- 18 利用沙子储存太阳能为建筑物供暖  
Polar Night Energy, 芬兰
- 32 使用黏弹性模型预测格陵兰岛的冰川消融  
Alfred Wegener Institute, 德国

## 特邀评论

- 36 使用声学仿真进行虚拟产品开发  
JJR Acoustics, 美国

Bosch, 德国

# 博世助力汽车行业 迈向电气化未来

博世等汽车电气元件和系统供应商正在推动全球汽车行业向电动汽车转变。通过仿真驱动设计流程，博世团队对三相逆变器及其直流支撑电容器的设计进行了优化，从而能够在研发早期就发现具有潜在破坏性的“过热区”。

作者 ALAN PETRILLO

就像巴黎的游客会被卢浮宫吸引一样，德国斯图加特的游客也会成群结队地涌向展示这座城市伟大作品的博物馆。巴黎或许因德加或莫奈而自豪，但斯图加特同样因梅赛德斯-奔驰和保时捷而闻名世界。这些著名的汽车制造商都在这个他们称之为“家”的德国西南部城市设立了博物馆，熠熠生辉的展厅里陈列了许多历史悠久且具有影响力的汽车，这些汽车几乎都是由燃油内燃机提供动力。未来，斯图加特可能仍将是德国汽车工业的中心，但内燃机汽车在汽车行业的核心地位还能继续维持下去吗？

即使是最成功的汽车制造商也必须保持创新来适应不断

变化的环境，德国汽车企业及其全球合作伙伴正在通过开发电动汽车来实现这一目标。作为一家成立于斯图加特的汽车公司，罗伯特·博世 (Robert Bosch) 当前关注的一个重点就是电动汽车，他们为全球的汽车制造商提供电动传动总成、系统和零部件。

随着汽车工业向电气化未来快速发展，博世正在加速电动传动系统基本组件的研发。逆变器是电动传动系统中的一个组件，用于将汽车电池的直流电转换为交流电，为电机提供动力 (图 1)，其中的集成直流支撑电容器 (图 2) 决定着逆变器平稳提供电流的能力。“电容器是逆变器中最昂贵的组件之一，其性能将直接影响逆变器的性能和可靠性，对传动系统的运行至关重要。”博世汽车电子的高级专家 Martin Kessler 解释道。

为了实现宏大的电气化目标，全球汽车行业需要对逆变器及其电容器进行不断的改进和优化。Kessler 和他的团队依靠多物理场仿真来测试和改进博世的直流支撑电容器设计，并基于仿真分析对新设计的样机进行完善和优化。“仅靠测试根本无法预测潜在的问题，我们需要保持仿真和样机设计齐头并进。” Kessler 说道。

## » 电动汽车的新时代

“司机们，发动你们的引擎！”仿佛听到了开启一场全球性

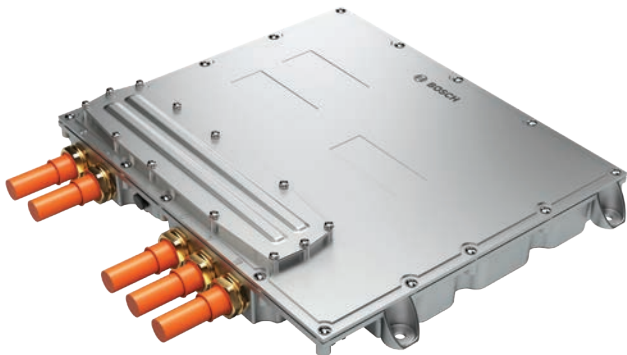


图 1 用于汽车传动系统的博世三相逆变器。

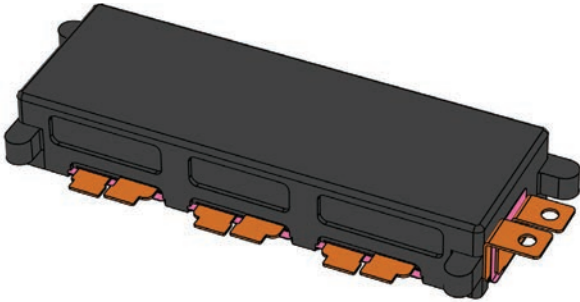


图2 典型的直流支撑电容器，右侧为电池接口，正面为晶体管连接端口。

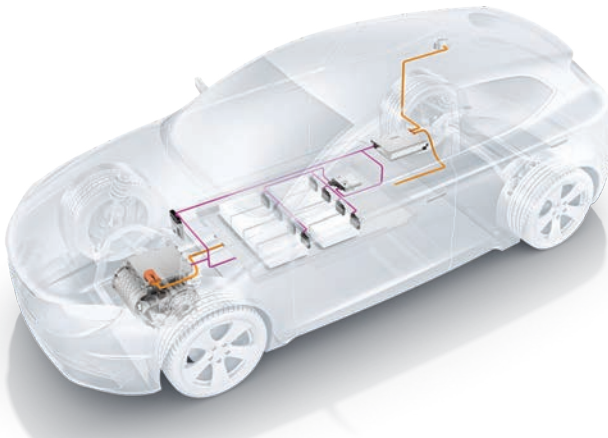


图3 一个通用的电动传动系统的电流路径示意图。电流由右侧的充电整流器流向汽车中部的电池。电池为三相逆变器提供直流电流，逆变器安装在动力总成电机的上方，用于将直流电转换为三相交流电，为汽车的驱动电机提供电能。

比赛的号召，世界各地的人们纷纷发动轰隆作响的内燃机引擎，开始了他们一天的生活。但是当汽车尾气排放对环境的影响越来越严重时，这种熟悉的声音或许并不美好。为了减少尾气排放及其对全球气候变化的影响，汽车工业正在加速生产电动汽车和电动卡车。许多汽车企业都开发了自身品牌的电动汽车，但这些汽车引擎盖下的组件系统往往依赖于外部供应商的技术和专业知识。

全球性支柱产业中的这一重大转变值得我们关注。领先的汽车制造商通常也是全球最大的雇主之一，他们将很大一部分的研发和生产能力都投入到了生产燃油发动机上，从通用汽车 (General Motors) 和宝马 (Bayerische Motoren Werke, BMW) 的命名中，也可以看出内燃机在这些公司中的核心地位。为什么以发动机闻名的公司会向外寻求帮助来制造汽车呢？或许是因为电气化的趋势正在迫使汽车行业去了解如何生产一种完全不同类型的引擎。

## » 电动传动系统的内部构造

制造一辆纯电动汽车，并不仅仅是用电动机代替发动机，或者用电池代替油箱。这些常见的设备只是复杂系统的一部分，还需要通过不断地调整以适应每辆车运行时不断变化的工况，从而为车辆提供平稳、可靠的性能 (图3)。

## » 不可或缺的逆变器和至关重要的电容器

逆变器在汽车传动系统中的工作原理很简单，但在实践中对它的要求却非常复杂 (图4)。它必须能够使用电池提供的直流电来驱动交流电机，同时还需要适应负载、电量、温度，以及其他影响系统部件性能的因素的波动。所有这些要求都要在严格的成本控制和空间限制下实现，并且这些组件还必须在未来几年内仍能保持良好的运行状态。

要了解逆变器的功能，就要考虑三相交流电机需要什么才能运行。如果连接到直流电流，电机并不会旋转，它需要三种波形不同但互补的交流电，才能使其三组励磁线圈以一定的顺序通过磁场吸引转子的各个部分，使转子转动。“为了控制电机的运动，我们必须控制逆变器输出电流的幅值和频率。电机的速度与频率成正比，而振幅有

助于确定其扭矩。” Kessler 解释道。

“流过晶体管的理想电流波形的斜率通常很大，实现这种高斜率电流开关模式的唯一方法是在电源通路上保持非常低的电感。” Kessler 进一步解释道。电感阻碍电流的变化，而电流的任何微小变化都将受到反向感应电压的限制，这将影响理想电流波形和电机的平稳转动。

为了减少晶体管电源通路中的电感，在电池的输入引线两端并联了一个电容器，该电容器与晶体管直接相连，为晶体管提供理想的电流波形，被称为直流支撑电容器 (图5)。该电容器具有很低的阻抗，可使电池侧的所有纹波电压降至最低。

一个典型的电容器由两个电极组成，电极中间由空气或某种材料形成的绝缘间隙隔开。博世使用的是金属聚丙烯薄膜电容器，薄膜的每一面都喷涂了一层金属涂层 (形成电极)，以提供必需的介电间隙，然后，金属薄膜被紧密缠绕成罐状。与逆变器一样，电容器的原理虽然简单，但实际隐藏着需要多方面考虑的工程设计问题。

## » 设计直流支撑电容器面临的挑战

电容器广泛应用于各类电子设备中。在过去的7年

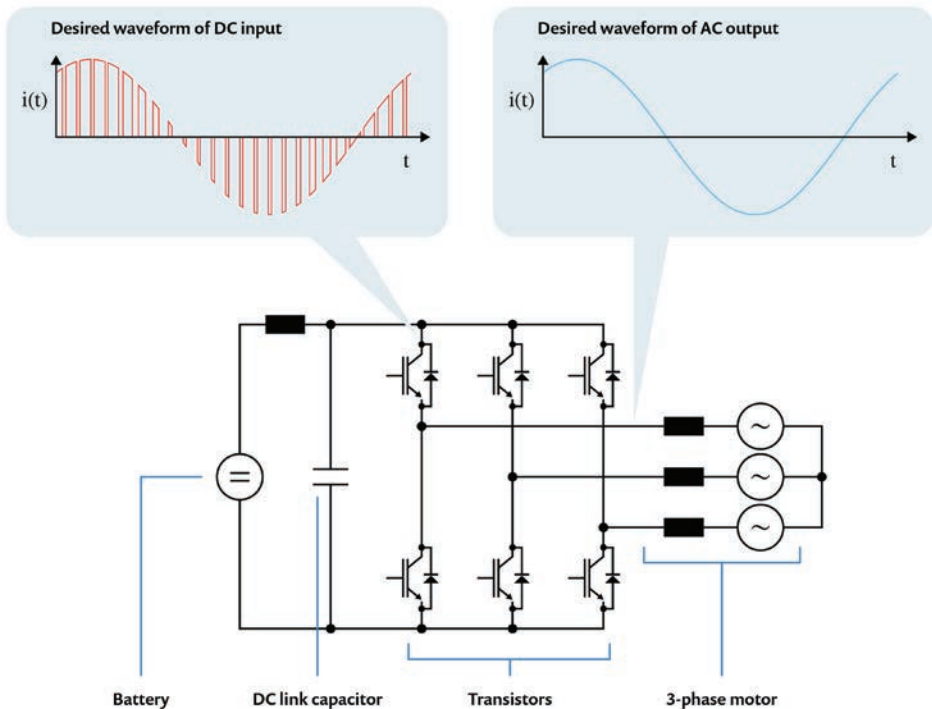


图 4 在三相逆变器内部，电池提供的直流电流通过三组晶体管开关被转换为三相交流电流。依次打开和关闭开关使晶体管产生三个相位不同的交流电，从而驱动汽车的电机旋转。直流支撑电容器用于管理输入的电流。  
图注：Desired waveform of DC input – 所需直流输入的波形；Desired waveform of AC output – 所需交流输出的波形；Battery – 电池；DC link capacitor – 直流支撑电容器；Transistor – 晶体管；3-phase motor – 三相电机

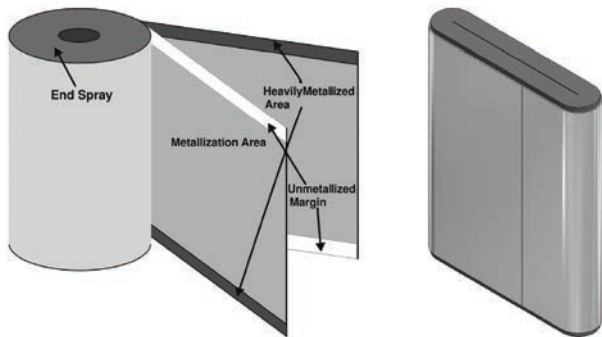


图 5 直流支撑电容器由卷绕成细长罐形的金属聚丙烯薄膜制成。  
图注：End Spray – 末端喷涂；Heavily Metallized Area – 高度金属化区；Metallization Area – 金属化区；Unmetallized Area – 未金属化区

中，Martin Kessler 一直负责博世的直流支撑电容器设计。他于 1989 年加入博世，自 2010 年以来一直从事电动汽车技术工作。这样一位经验丰富的工程师致力于研究这一组件，也说明了电容器的重要性和复杂性。

“为什么我们不能直接从市场上购买一个电容器？” Kessler 反问道。“这取决于多个相互依赖的因素。首先，我们对电容器的性能和可靠性有很高的要求。其次，我们对空间尺寸有

严格的限制。第三，我们对温升要求非常严格，因为电容器中的聚丙烯薄膜最高只能耐受 105°C 左右的温度。整个逆变器的电磁和热特性的相互作用使这个问题更加复杂。最后，电容器相对而言比较昂贵。” Kessler 解释道。

### » 仿真有助于解决“黑箱”问题

为了应对直流支撑电容器设计的挑战，Kessler 开发了一种将试验测试与多物理场仿真相结合的设计流程。基于仿真的分析是他工作中不可或缺的一部分，例如高温和耦合效应会引起局部过

热而导致器件失效，但是寻找和测量这些潜在的过热区难度较大。“我们曾尝试通过在样机内部放置多个热电偶，并测量不同负载点的温度来定位过热区。但必须得承认，如果没有非常好的运气，我们可能永远找不到这样的过热区。我们需要非常幸运才能将热电偶放置在正确的位置。” Kessler 笑着说。

“仅仅建立和分析简单的 2D 电容器模型是不够的。” Kessler 继续说道，“逆变器是一个具有内部谐振和复杂的损耗分布的分布式系统，电磁-热耦合分析必须考虑集肤效应和邻近效应。如果不采用 3D 有限元方法，我们无法计算出最高温度，也无法模拟电磁-热耦合效应的空间分布。COMSOL Multiphysics® 软件是处理这种复杂问题的最佳工具。” (图 6 - 图 7)

Kessler 在设计过程中，尽可能使用测量结果来验证仿真模型，并使用经过验证的模型找出潜在问题 (图 8)。“通过仿真定位模型中的过热区域，可以帮助我们避免很多在开发后期，甚至在样机开始生产之后才出现的问题。” Kessler 解释说，“这样一来，我们就可以根据准确的仿真结果，在设计早期就针对潜在的问题进行调整。”

“我们对每一个新的设计

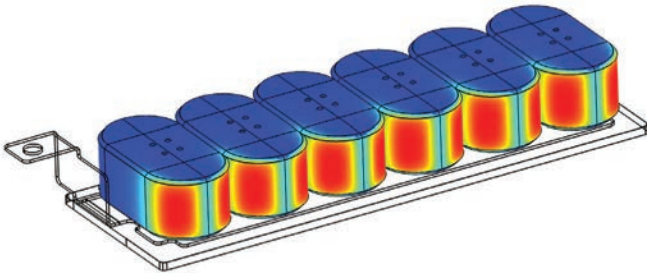


图 6 直流支撑电容器内部电磁效应的 3D 模型仿真图。

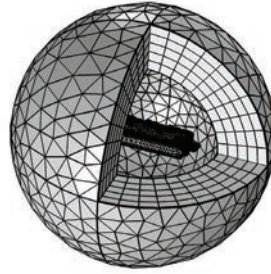


图 7 产生电磁场的电容器模型，用于计算损耗分布。

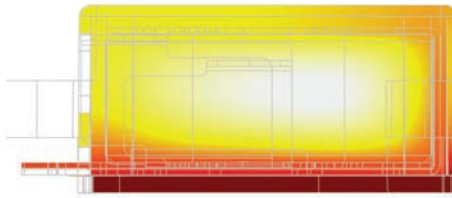
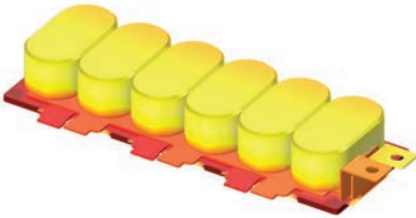


图 8 显示了直流支撑电容器内部热效应的 3D 仿真模型，剖视图显示了电容器中过热区域的位置。

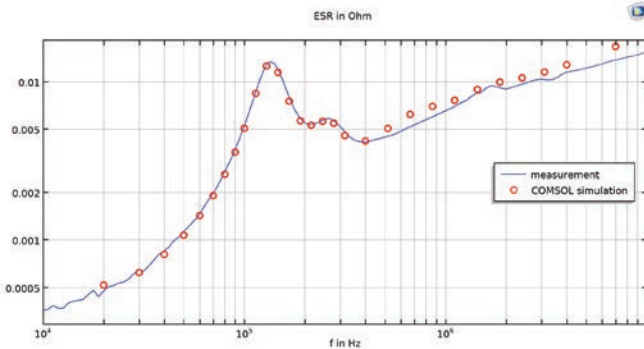


图 9 通过仿真计算的等效串联电阻 (ESR) 曲线，与样机测试得到的结果进行比较。这些曲线良好的一致性有助于验证模型，进行进一步分析。

图注：measurement – 测量值；COMSOL simulation – COMSOL 模拟值

都会进行电磁模拟和试验验证，并将计算出的等效串联电阻曲线与试验测量结果进行比较(图9)。如果这些曲线一致，我们就可以为稳态和瞬态传热计算设置边界条件。”Kessler 解释说，“我们可以将 COMSOL Multiphysics® 模型中的探针结果与热电偶测得的温度曲线进行比较。如果结果一致，我们就可以模拟那些需要将温度保持在限定范围内的所有关键工况。”测试数据可以通过 COMSOL® 软件的附加产品 LiveLink™ for MATLAB® 模块导入到 COMSOL 软件中。

“在进行仿真分析之前，我们必须考虑应该将哪些因素纳

入模型中。代工厂提供的一些变量，例如最大直流支撑电压与我们的仿真相关性不大，但是电流、开关频率、电机参数和调制策略等因素都有助于定义电流频谱。我们需要计算三相电流的输出频谱，用于确定功率损耗。只要获得了功率损耗，我们就可以使用 COMSOL 多物理场仿真软件对电流频谱的频率进行谐波分析，然后将所有谐波的损耗加和得到最终的结果。”Kessler 解释道。

一些重要的参数可以帮助 Kessler 和他的团队确定耦合效应。“我们使用 COMSOL 软件的附加产品 AC/DC 模块来计算电容器的寄生电感，得到了通过电容器绕组或内部母线的完整直流损耗分布。然后将这些结果进行耦

合，并通过传热模块确定封装零件与温度相关的电阻率，最终我们能够确定由电磁特性导致的过热区域的温度峰值。”Kessler 补充道。

仿真分析中的发现可能会改变设计。一个新的电容器设计通常要经过三轮测试。“从一个阶段到下一个阶段，使用仿真优化后的电容器性能提升更加明显。我们的知识在快速增长，这将反映在最终产品中。”Kessler 总结说。与之前的设计相比，最新一代的博世逆变器的工作范围扩大了 6%，功率密度提升了 200%。

## » 加速汽车行业电气化进程

Martin Kessler 认为，随着汽车制造商将更多的产品线转向电力驱动，快速且低成本的研发需求也会随之增加。“电动汽车正在快速发展，我们预期代工厂将向我们提出更多需求，比如不同功率等级的逆变器，以及更严格的尺寸限制。未来会有更多的产品需要新的电容器设计。借助仿真驱动开发的方式，我们有信心跟上这一增长步伐。”Kessler 说道。

在不久的将来，或许斯图加特汽车博物馆的游客会驻足欣赏已经成为历史的电机和逆变器，正是它们推动汽车行业进入了一个全新的电气时代。◎

MTC, 英国

# 仿真 App 助力 增材制造工厂的精准调控

增材制造工艺, 可用于快速定制高质量零部件。英国制造技术中心与航空航天领域的合作伙伴共同建立了一个粉末床熔融设施。他们开发了仿真模型和仿真 App, 帮助工厂员工在操作过程中做出明智的决策。

作者 ALAN PETRILLO

工业革命始于 18 世纪中期的英国。虽然那个充斥着煤烟的铸造厂和磨坊的时代早已过去, 但制造业仍然不可或缺且充满挑战。采用增材制造工艺应对现代工业挑战是一个充满前景的方法, 例如 3D 打印、粉末床熔融和其他新兴技术等。为了完成快速、精准和可定制的生产, 增材制造不仅需要对工厂设备进行重新调整, 还需要新的工厂运行和管理方法。

因此, 英国制造技术中心 (Manufacturing Technology Centre, MTC) 借助仿真模型和仿真 App 来提高其现有的金属粉末床熔融增材制造的水平, 帮助工厂员工在操作时能够基于实际情况进行决策。该仿真 App 是使用 COMSOL Multiphysics® 软件中的 App 开发器创建的, 具有将全尺寸增材制造工厂与其“数字孪生体”相匹配的潜力。

“该模型可以帮助我们预测粉末床熔融设施内的热量和湿度对产品质量和工人安全的影响,” MTC 仿真团队的技术经理 Adam Holloway 介绍到, “结合工厂反馈的数据, 该仿真 App 还可以帮助我们将模拟结果纳入日常决策中。” MTC 的项目展示了现代工业制造人员如何直接受益于仿真技术, 以及仿真如何帮助制造业塑造未来。

## » 应用于航空航天的增材制造项目

MTC 总部位于历史悠久的英国工业城镇考文垂 (图 1), 它始终将目光聚焦于未来。为了帮助英国工厂跟上世界的步伐, MTC 在全英国推广高附加值的制造业, 这也是 MTC 团队向国家增材制造中心投入了大量人力和技术资源的原因。

“采用增材制造工艺不仅仅是需要安装新设备, 我们的客户同时也在寻找

能够支持增材制造工厂运营的数字基础设施。” Holloway 说道, “除了使用企业软件和数据连接, 我们也在探索如何将仿真嵌入他们的系统中。”

航空航天产业的数字化重构增材制造 (DRAMA) 项目为 MTC 进行这一探索提供了宝贵的场所, 该项目与众多制造商合作开展, 项目提案中包括前面提到的新型粉末床熔融增材制造设施。有了这个小型工厂作为 DRAMA 的舞台, Holloway 和他的仿真专家同事在增材制造航空零部件的成功生产中发挥了重要作用。

## » 软材料叠加成为固体

一个制造过程为何被称为“增材”? 为什么这么多的行业都在探索增材制造方法? 广义上, “增材”过程是指通过逐层增加材料, 而不是删减材料, 来生成物体。传统生产零部件的减法或还原过程



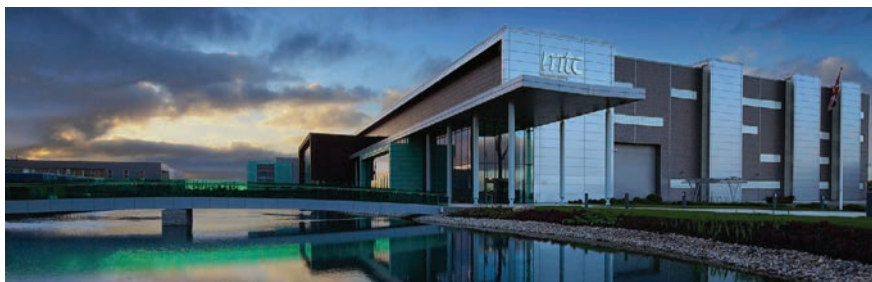


图 1 位于英国工业城镇考文垂的 MTC 总部。



图 2 一个通过金属粉末床熔融工艺制造的零件。

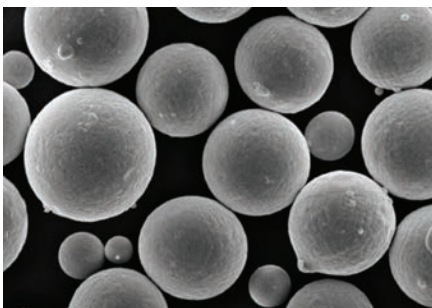


图 3 用于金属粉末床熔融工艺的金属粉末颗粒的微观特写。

可以从一块固体金属开始，然后通过切割、钻孔和研磨，最后成型。相反，生产相同零部件的“增材”方法则是先从空白空间开始，然后将松散或柔软的材料在精准控制下添加到该空间，直到形成所需的形状。最后，柔软的材料固结成耐用的成品零部件。

不同的增材物质材料需要不同的方法来生成和固化。常见的 3D 打印机是通过温热的塑料丝来制造物体，塑料丝之间相互联结，并在冷却后变得更坚硬。相比之下，金属粉末床熔融工艺，顾名思义，是将一种粉末状金属加热后熔化，冷却后再凝固的过程。图 2 展示了一种通

过金属粉末床熔融工艺制造的零件。

### » 温度和湿度对金属粉末床熔融工艺的影响

“人们很早前就已发现增材制造方法的市场，但在大规模应用方面一直存在许多困难。” Holloway 说，“其中一些困难可以在产品和增材制造设施的设计阶段克服，然而如环境条件对增材制造生产的影响等其他问题，则需要生产过程中解决。”

对 DRAMA 团队来说，保持对温度和湿度的精细控制是一项基本的任务。“用于粉末床熔融工艺的金属粉末（图 3）对

外部环境条件高度敏感，” Holloway 解释道，“这意味着它甚至在储存时就开始氧化并吸收周围的水分，这些过程在整个工艺过程中会持续进行。金属粉末暴露在热湿环境中会改变它的流动方式、熔融方式、充电方式以及固化方式，所有这些因素都会影响所生产零件的最终质量。”

对金属粉末的处理不当不仅会影响产品质量，还会威胁到工人的健康和安全。“用于增材制造工艺的金属粉末是易燃且有毒的，当它变干时，会变得更加易燃。” Holloway 解释说，“我们需要持续地测量和控制湿度，以及飘散的粉末在厂房中的传播。”

为了保持适宜的环境条件，制造商可以通过一个完整的环境控制系统来增强工厂的通风，但这将非常昂贵。据国家增材制造中心估计，在这个相对简陋的测试设施上增加环境控制将花费近 50 万英镑（约 400 万人民币）。是否有其他方法使他们能够在不增加复杂系统的情况下充分地管理温度和湿度呢？

### » 基于多物理场仿真的快速响应式过程管理

也许使用多物理场仿真进行精细地过程管理可以提供更经济的替代方案。“作为 DRAMA 项目的一部分，我们利用 COMSOL® 软件的计算流体力学功能创建了一个厂房的仿真模型（图 4），然后使用有限元法求解了描述热传导和流体在厂房内空气中流动的偏微分方程。” Holloway 介绍道，“这使我们能够研究环境条件将如何受到多种变量的影响，包括外部的天气，运行的机器数量以及机器在车间内的摆放方式。考虑到这些变量的模型可以帮助工厂员工调整通

**“我们尝试以一种简单、易懂的方式来呈现一些非常复杂的计算结果。基于模型创建的仿真 App，可以让员工在日常轮班期间在笔记本电脑上运行预测模拟。”**

—— ADAM HOLLOWAY, MTC 技术经理

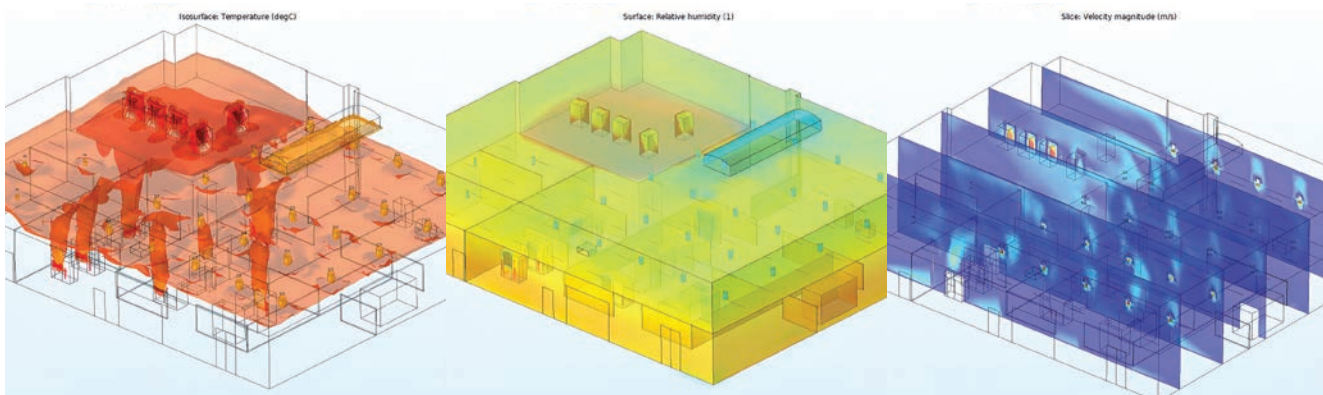


图 4 运行着 7 台机器的 DRAMA 厂房仿真图。左图是显示温度变化的等值面图；中间的图像显示了湿度变化的分布；右图是一个切面图，显示了整个空间的气流速度。

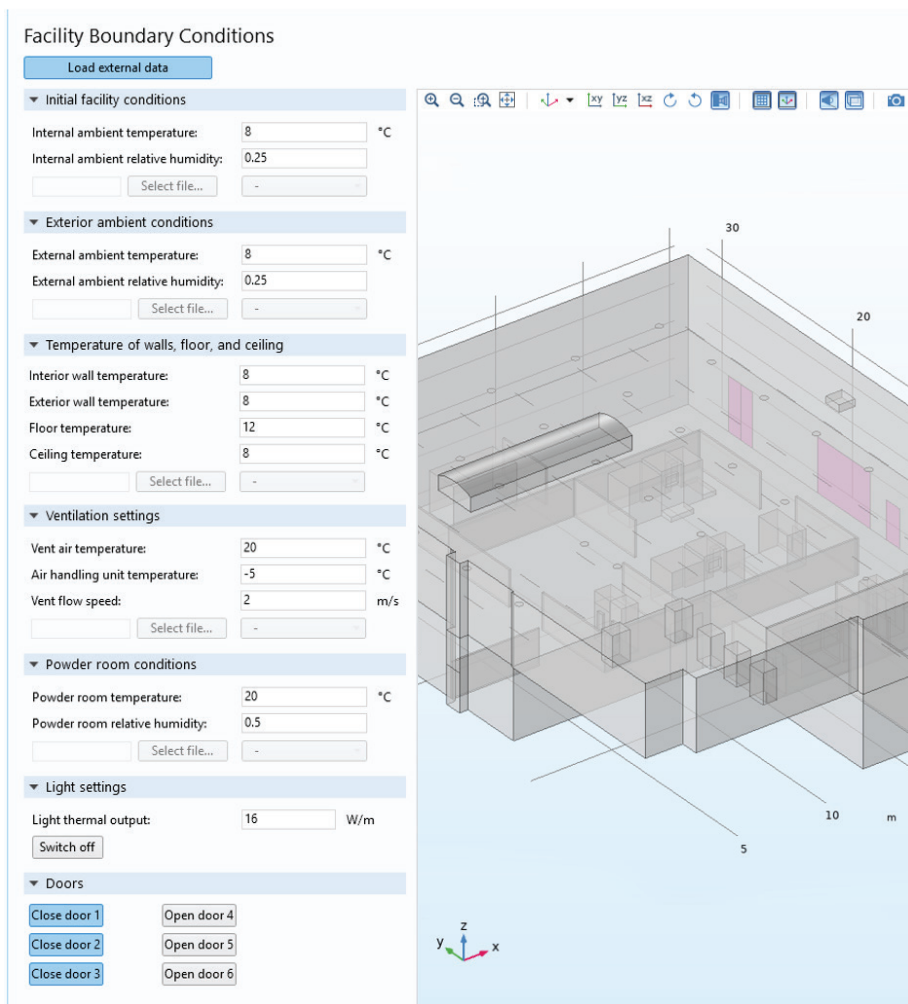


图 5 DRAMA 粉末床熔融设施的仿真 App，显示了机器和通风口的位置。用户可以指定整个空间的初始温度和湿度，以及空气处理系统、灯光和金属粉末存储室的设置。在这个示例中，用粉色突出显示的是打开的门。

风和生产计划来优化环境条件。”他解释说。

### » 仿真 App 为工厂赋能

DRAMA 团队使用 COMSOL Multiphysics® 软件中的 App 开发器创建了一个仿真 App (图 5)，使更多的人可以访问和使用他们的仿真模型。“我们尝试以一种简单、易懂的方式来呈现一些非常复杂的计算结果。”Holloway 解释说，“基于模型创建的仿真 App，可以让员工在日常轮班期间在笔记本电脑上运行预测模拟。”

仿真 App 的用户可以在工厂轮班开始时定义相关条件，然后进行持续调整。在轮班的过程中，温度和湿度水平不可避免地会波动，也许工厂员工应该改变生产计划以保证零件质量，或者他们只需要打开门窗来改善通风。用户可以在仿真 App 中更改设置，来测试这些操作可能产生的效果。图 6 的等温表面图显示了打开增材制造厂房的制造室对空气温度的影响；图 7 显示了打开厂房的门对气流的影响。

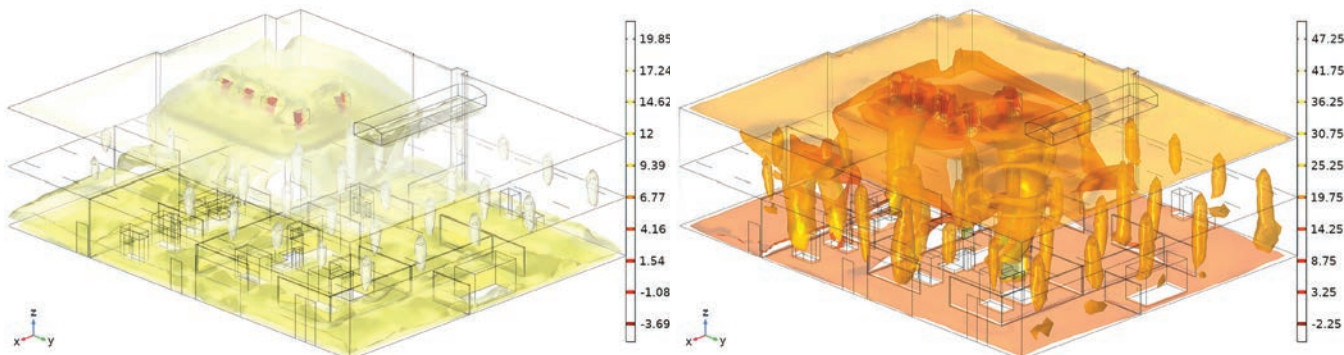


图 6 模拟机器热量和流量的输出随时间的变化。等温表面图显示了在开启厂房中每台增材制造机器的制造室 30 s (左) 和 60 s (右) 后的温度变化。

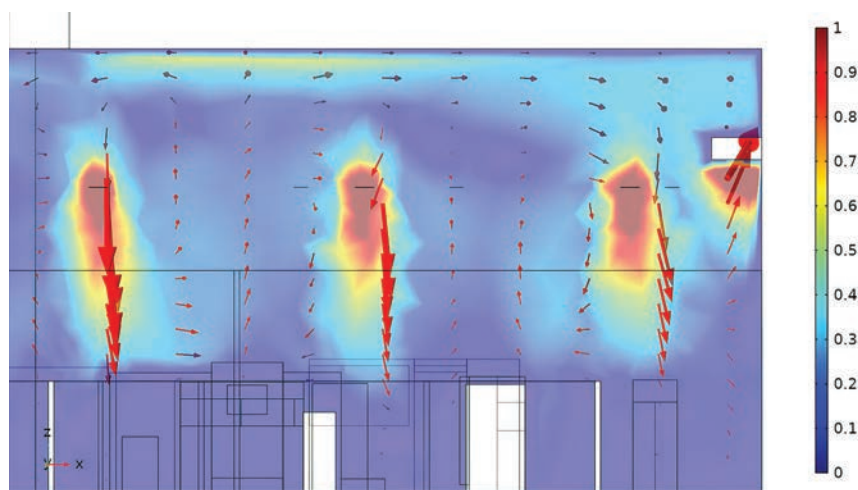


图 7 图中显示了打开一扇门对气流的影响。当出口风管正下方的门被打开时，流向出口风管的空气速度明显减弱。

## » 工厂车间内的仿真工作

作为构建一个完整的工厂级数字孪生体的中间步骤，DRAMA 项目的仿真 App 已经证明了它的价值。“我们的制造合作伙伴可能已经看到了仿真是如何帮助规划增材制造设施，但他们还没有真正的理解它是如何帮助工人进行实际操作的。” Holloway 说，“当流水线工人打开仿真 App，输入一些读数或导入传感器数据，便能迅速地获得对一批金属粉末当天变化的有意义的预测，这就体现了它的价值。”

除了为制造商带来实际的新见解，整个项目还提供了更广泛的经验。通过将生产线与动态仿真模型相结合，将仿真模型部署到它最能发挥作用的地方，即交到工厂车间工作人员手中，DRAMA 团队使整个设施运行更加安全、高产和高效。☉



DRAMA 厂房内的工作人员。

## » 迈向“工厂级数字孪生”

虽然当前开发的仿真 App 是向前迈出的重要一步，但它仍然需要人工手动输入相关数据。展望未来，DRAMA 团队设想构建一些更完整，也更强大的“数字孪生”增材制造设施。正如 Ed Fontes 在 2019 年 COMSOL 博客上的一篇文章中所描述的那样，数字孪生代表着“一种动态的、不断更新的真实物理产品、设备或过程”。值得注意的是，即使是最详细的系统模型也不一定是它的数字孪生体。

“要使工厂环境的仿真模型成为数

字孪生体，首先要向它提供来自实际工厂的实时数据，” Holloway 解释说，“一旦工厂模型在后台运行后，应该能够根据输入的数据调整其预测，并基于预测提出具体的操作建议。”

“我们将预测模型集成到一个反馈循环中，其中包括真实的工厂及其员工。我们的目标是建立一个整体系统，使它能够对当前的工厂条件做出响应，能够通过仿真预测未来的条件，并基于这些预测无缝地进行自我优化调整。” Holloway 说，“这样我们就可以真正地说，我们为工厂制造了一个数字孪生体。”

Exicom Tele-Systems, 印度

# 集总热仿真提升 汽车电池管理系统的性能

为了实现印度交通部门宏大的电气化目标，制造商必须加快诸如电池管理系统等关键部件的开发。印度 Exicom 公司使用多物理场仿真来探究不同的电芯和电池包设计的热行为，从而优化电池管理系统的性能。

作者 NEENA PICARDO

印度电动汽车市场正在快速增长，预计到 2030 年印度销售的汽车中将有超过 30% 是电动汽车。为电动汽车提供动力的电池包是印度电动汽车革命的主要驱动力之一。为了监测和管理电池包的性能和安全，通常会为电池包配备一个电池管理系统。该系统是一个电子系统，可以监测电池的电压、温度、冷却液流量和健康状况，并预测一些性能参数，如电流变化和发热，帮助电池包发挥最佳性能。

## » 仿真对开发精确的电池管理系统的作用

印度 Exicom Tele-Systems 公司致力于设计、开发和部署能源解决方案，包括最新的锂离子电池技术。迄今为止，该公司已经为总计超过 1.8 GWh 的锂离子电池部署了解决方案，领先全球同类型企业。他们还还为两轮电动车和轻型

电动汽车提供充电解决方案和电池管理系统，推动着印度电动汽车的发展。Exicom 公司的创新电池管理系统解决方案因其性能和寿命而备受赞誉。

在位于印度 Gurugram 的 Exicom 研发中心，Parmender Singh 博士领导的技术团队已经开发出一种电池管理系统，可用于精确监测和管理应用于较宽电压范围内（最高可达 1000 V）的锂离子电池。这个电池管理系统可用于各种化学成分的锂离子电池，如磷酸铁锂、磷酸亚铁锂、锂镍钴锰氧化物和镍钴铝酸锂等。

电池管理系统的精准度取决于编程或校准系统中各项输入的质量和准确性。例如，电池管理系统包括许多分布在电池包上的热传感器，为了准确监测电池包的温度分布并预测其性能，必须将传感器放置在正确的位置。这需要详细了解每个电芯的热量分布以及整

个电池包的热量变化情况。COMSOL Multiphysics® 仿真软件在这方面发挥了重要作用，仿真能够准确计算和校对如热量分布信息等的输入数据，这对于开发具有极高精度的电池管理系统是必不可少的。

## » 预测和防止潜在的热失控

Singh 博士的团队使用 COMSOL Multiphysics 软件对电芯的热行为进行了一系列分析。他们还分析了潜在的外部短路现象，这可能会导致热失控，即一种不受控制的自加热过程，进而损坏设备甚至引起火灾。Exicom 团队首先分析了具有不同外形尺寸的圆柱形电芯中产生的热量，并利用生成的电池热量曲线将该模型进一步扩展到电池包层面。“我们对改善风冷电池包的温度梯度特别感兴趣。” Singh 博士表示。

图 1 显示了圆柱形电芯在 1C 放电

过程中电芯层面的热仿真结果。图 1 中左图显示了温度分布, 其中最高温度在电芯的中间; 右图显示了温度的等值线分布, 进一步表明最高温度位于电芯中的活性材料位置。

经实验结果验证, 团队发现该仿真结果处于标准充放电曲线的  $\pm 5\%$  误差范围内。根据外部短路测试标准 UL1642, 该模型被进一步扩展至 100% 荷电状态下进行 2C 放电。

电池的正负极通过一个  $80 \pm 20 \text{ m}\Omega$

的电阻形成短路。团队使用电池充放电曲线的实验数据对 COMSOL® 软件的集总热仿真方法进行了验证。他们还进一步开发了两个模型:

- 使用 COMSOL® 软件中的优化功能建立的圆柱形电芯的循环和日历容量衰减模型
- 利用提取的电化学参数为圆柱形电池建立的高保真伪二维 (P2D) 模型

研究团队发现, 集总方法使它们能

够用最少的参数构建模型, 例如电芯的几何形状、电极厚度、热导率、热容量、驱动循环, 以及开路电压 - 荷电状态表等, 所有这些参数都可以直接从电池包制造商处获取。

通过实验提取这些参数不仅耗时, 还容易因实验条件的变化而产生误差。例如由于环境温度的波动, 提取一个准确的电池热曲线需要在不同的环境温度下进行大量的测试。然而, 借助仿真, Singh 博士和他的团队能够非常轻松地完成这些实验。他们能够高效地研究充放电曲线、不同充放电速率下的热行为, 以及由不同电池化学成分的外部或内部短路 (图 3) 导致的热失控 (图 2)。他们还能够识别电池包中的热点, 并根据容量衰减分析精确地确定电池等级。这些仿真结果被直接应用于缩短电池管理系统的开发周期, 因为热点指示了在电池管理系统内部署热传感器的最佳位置, 因此可以最有效地发挥作用。Singh 博士说: “COMSOL® 软件在电池设计和热仿真领域是一种易于学习、适用性强的有限元工具。”

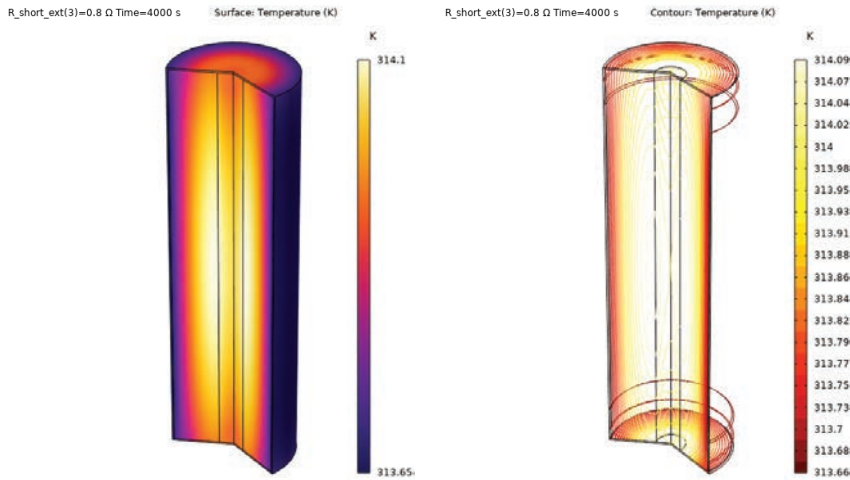


图 1 圆柱形电芯在 1C 放电过程中的温度分布 (左) 和温度的等值线分布 (右)。

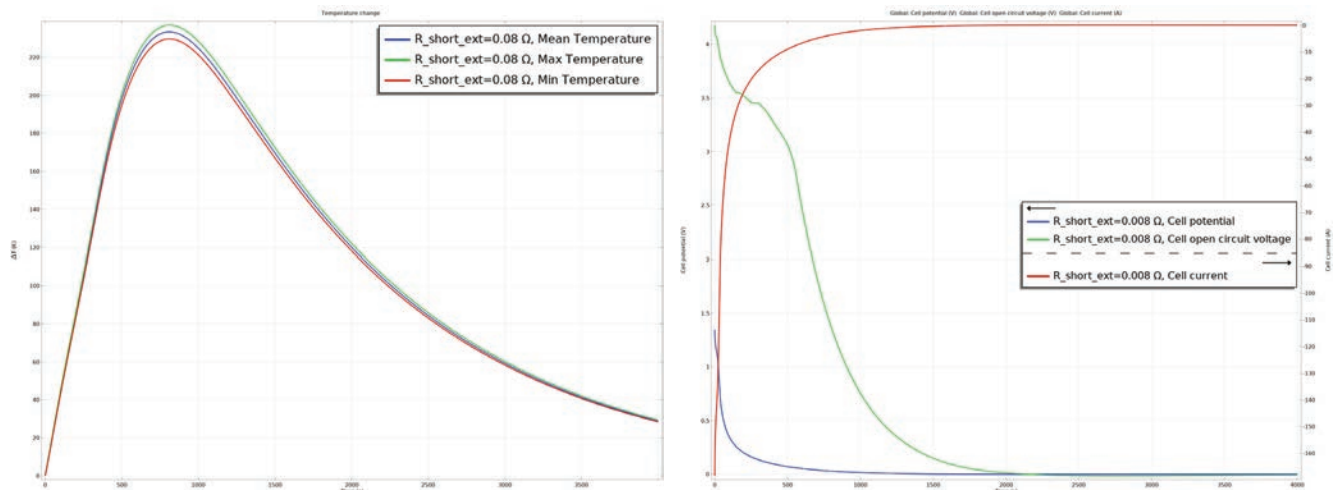


图 2 热失控后电池的温度分布 (左) 以及电化曲线 (右)。

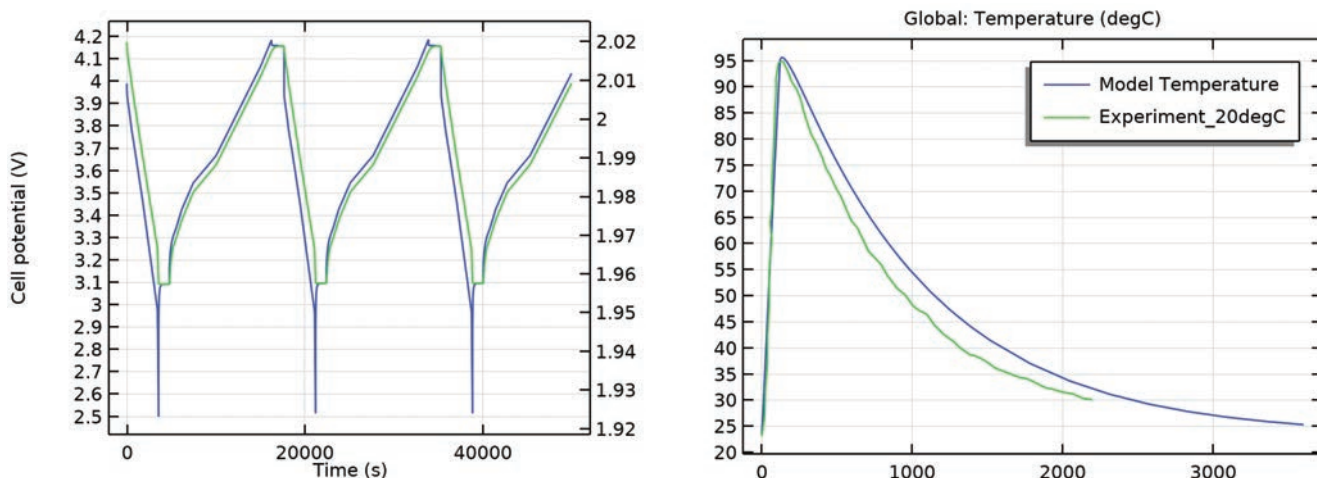


图3 外部短路测试的仿真结果和实验结果。

图注: Cell potential – 电芯的电势; Model Temperature – 模拟的温度; Experiment\_20degC – 实验温度 20°C

### 未来应用: 扩展仿真范围以预测电池老化

除了热仿真, Singh 博士还扩大了仿真的使用范围, 用于研究另一个重要现象: 电池老化。在电池的使用寿命中, 由于不可逆的物理和化学变化, 其健康状态会逐渐恶化。例如, 固体电解质间相层的生长会导致电芯中的孔隙率减小, 这反过来又会导致电池极化和内阻的增加。磁场探测是一种监测电池健康状态的非侵入式方法。为了证明磁场探测方法的潜力, Singh 博士在 COMSOL® 中开发了一个多物理场模型, 用于评估磁场响应、电池极化和内阻 (图 4)。研究团队观察到, 电极孔隙率的变化对磁场响应应有显著影响。虽然这项研究目前还处于初级阶段, 但其应用前景广阔。Singh 博士憧憬到: “我们期望对这一现象的进一步研究将能够开发和部署电池老化的监测功能, 以及对电池管理系统自身的保护机制。”

Exicom 团队目前正致力于电化学 P2D 模拟, 用于电芯层面的热量和容量衰减分析。为了在热失控过程中获得更

高精度, 团队计划进一步扩展模型, 在电极和固体电解质间相层增加额外的放热方程。他们还计划使用集总容量衰减模型进行循环和日历预测分析。未来, 他们还计划为电池的荷电状态和健康状态构建降阶模型, 并将模拟结果输出到 MATLAB® 中生成用于专用集成电路 (ASIC) 的代码。

随着印度及全球加速向电动交通工具转型, 预计未来几年对电池技术的研究将大幅增加。对于希望提供更有效的解决方案并加快产品上市时间的电动车企业而言, COMSOL® 仿真软件提供了一个至关重要的先机。☺

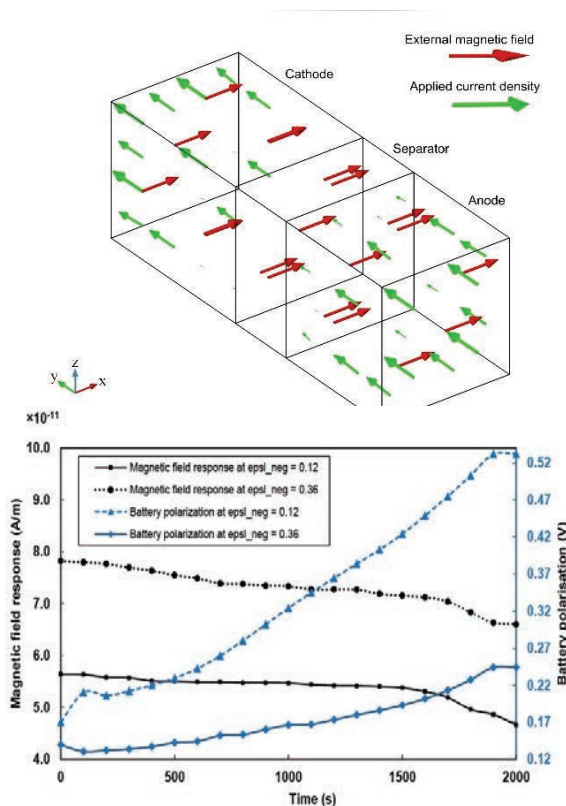


图4 三维电池几何结构 (上)。在阳极孔隙率为 0.12 和 0.36 时电池放电期间的磁场响应的变化和极化行为 (下)。

图注: Cathode – 阴极; Separator – 隔膜; Anode – 阳极; External magnetic field – 外部磁场; Applied current density – 施加的电流密度; Magnetic field response – 磁场响应; Battery polarization – 电池极化

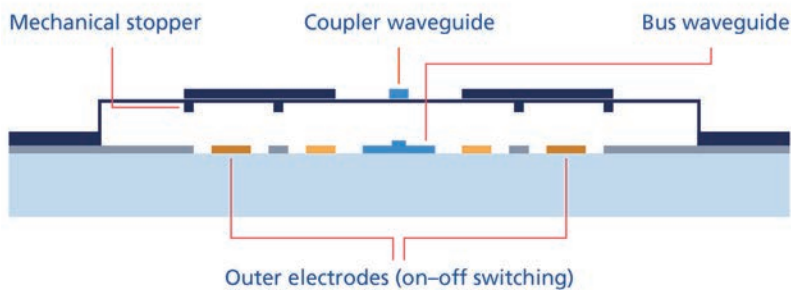
EPFL, 瑞士

# 借助仿真 设计硅光子 MEMS 移相器

作者 ALAN PETRILLO

构成互联网支柱的光纤网络依赖大量电信号处理装置。纳米级硅光子网络器件,可以提高光纤网络的速度、容量和可靠性。为了设计这种体积小但功能强大的装置,瑞士洛桑联邦理工学院的研究团队使用仿真技术来优化其光学和机电性能。

## Phase shifter off (no optical coupling)



## Phase shifter on (continuous tuning)

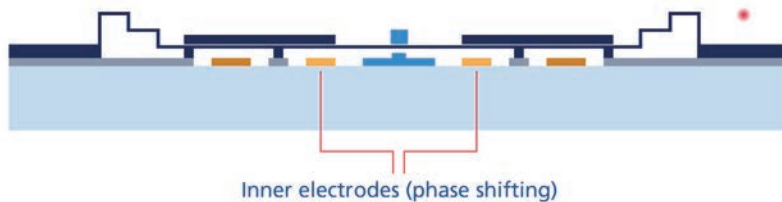


图 1 移相器内部微机电系统 (MEMS) 装置的两个运动阶段。

图注: Phase shifter off (not optical coupling) – 移相器关闭 (非光耦合); Mechanical stopper – 机械制动器; Coupler waveguide – 波导耦合器; Bus waveguide – 总线波导; Outer electrodes (on-off switching) – 外部电极 (转换开关); Phase shifter on (continuous tuning) – 移相器开启 (持续调节); Inner electrodes (phase shifting) – 内部电极 (相位移动)

现代这个被互联网连接的世界常被称为“连线”,但实际上大多数核心网络数据流量是通过光纤传输的。尽管如此,现有的基础设施仍然依赖大量嵌装在光纤网络中的电信号处理组件。用光子器件替代这些组件可以提高网络速度、容量和可靠性。为了实现这个具有应用前景的新兴技术,瑞士洛桑联邦理工学院 (Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL) 的一个跨国团队开发制作了一种有望应用于下一代光纤数据网络的重要组成装置:硅光子移相器。

## » 照亮全光纤网络之路

采用光子器件处理光子信号似乎是符合逻辑的,但为何这项技术还未普及应用?“这是一个很好的问题,但很难

回答。”瑞士电子与微技术中心的工程师 Hamed Sattari 说道。他专注于研究光子集成电路，重点研究 MEMS 技术，是开发硅光子移相器的 EPFL 光子团队的关键成员。在研究基于 MEMS 的光信号处理方法的过程中，Sattari 和他的同事采用了一种新兴的制造技术。“也许十年前，我们无法可靠地生产用于这些装置的可移动集成结构，” Sattari 表示，“但是依靠微电子行业当前的制造能力，硅光子和 MEMS 技术将越来越容易实现。我们的目标是利用现有的制造能力优化光纤网络基础设施。”

移相器设计项目是 EPFL 为光纤数据网络和空间应用开发可编程的光子组件的扩展研究。这些器件包括开关、芯片到光纤光栅耦合器、可变光衰减器，以及调制光信号的移相器。“这类应用中现有的光学移相器往往体积庞大，或存在信号损失问题。我们的首要任务是开发一个损失更低、体积更小的移相器，并使其可扩展用于大多数的网络应用。由 MEMS 驱动的可移动波导可以在小范围内以较低的能耗调制光信号。”Sattari 解释道。

### » 可移动波导如何帮助调制光信号

MEMS 移相器的作用听起来很简单：通过改变光的相位来调节光速。但它的设计却是非常复杂的。当光携带数据信号时，其速度变化会导致信号发生变化。快速而精确的相位移动将由此调制信号，支持在整个网络中以最小的损失进行数据传输。为了改变光通过光纤导体或“总线波导”的相位，MEMS 装置将一块被称为“耦合器”的半透明硅移动到靠近总线的位置。

移相器中 MEMS 装置的设计包含两

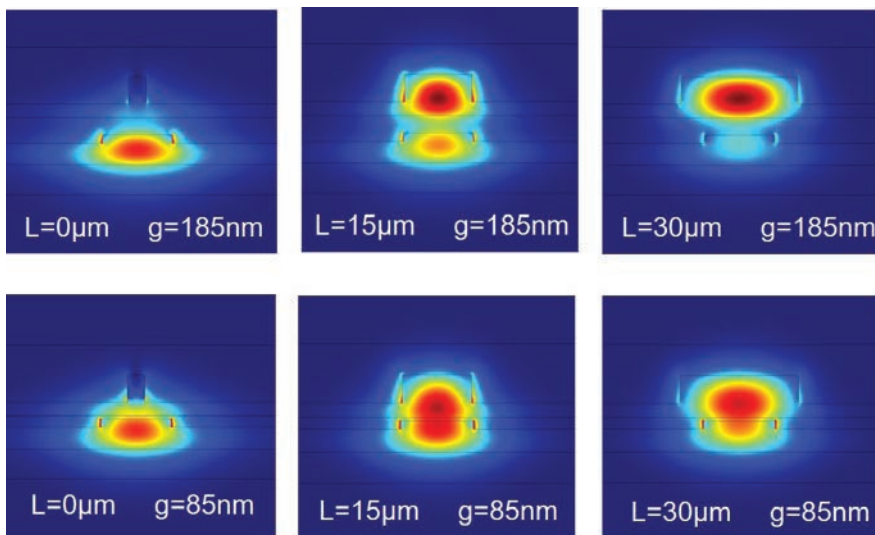
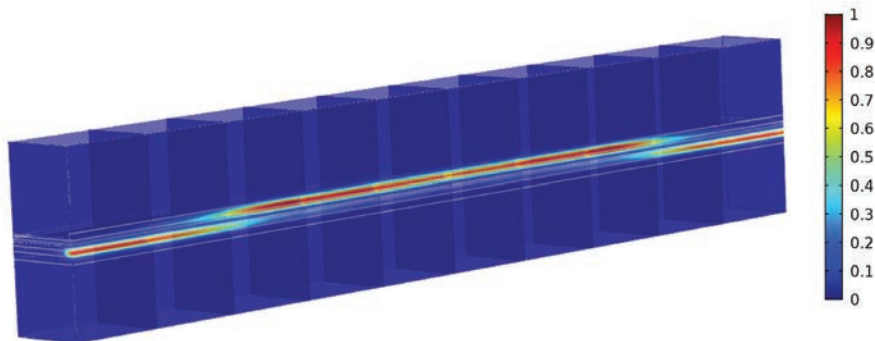


图 2 光从左到右通过由一个光学总线和一个耦合的可移动波导组成的路径(上)；模拟的光波形通过耦合器件时的横截面(下)。通过仿真调整两个光学元件之间的距离，EPFL 团队可以确定该距离如何影响光信号的速度或相位。图片由 EPFL 提供，并获得许可 (CC BY 4.0)。

个运动阶段 (图 1)。第一个阶段提供波导耦合器的简单开关运动，使耦合器与总线接合或分离。当耦合器接合后，第二阶段提供更精细的运动范围，用于调整耦合器和总线之间的间隙，从而实现光信号相位变化的精准调制。“耦合器由具有高折射率的硅制成，将其移向总线会改变信号的相位。当两个组件耦合时，通过总线的光波也会通过耦合器，波速将会减慢。” Sattari 解释道。如果不能精准控制耦合器和总线的光耦合，光的波形会失真，将会导致信号和数据丢失。

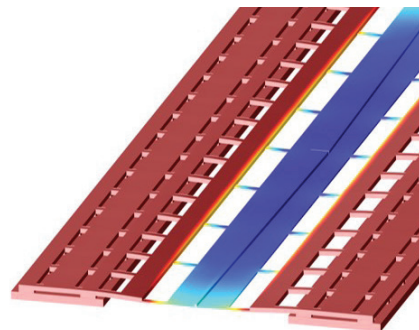


图 3 可移动波导支撑结构变形的仿真。悬挂着可移动波导的薄元件将对施加的电压产生响应而弯曲。图片由 EPFL 提供，并获得许可 (CC BY 4.0)。



## » 通过光学和机电仿真进行纳米级设计

为了尽可能精确和可靠地控制光的耦合过程, Sattari 团队面临的挑战是设计一种纳米级装置。由于他们设计的移相器通过电流来移动光学元件, Sattari 和 EPFL 团队采用双轨方法进行器件设计, 目标是确定需要向 MEMS 装置施加多少电压才能在光子信号中引起所需的偏移。仿真是确定建立电压与相位关系的多个数值的关键技术。“电压与相位是一个复杂的多物理场问题。COMSOL® 多物理场仿真软件提供了多种选择, 帮助我们将这个庞大的问题分解为更小的任务。” Sattari 介绍道, “我们使用 COMSOL 软件的 RF 模块对两个拱形结构进行了光学仿真, 并使用结构力学模块进行机电仿真。”

光学仿真 (图 2) 包括用于确定耦合的波导元件有效折射率的模式分析, 以及信号传播研究。“我们的目标是让光在进入和退出移相器时在其相位发生所需的变化。为了实现这一目标, 我们借助 COMSOL® 来确定系统的特征模式。” Sattari 说道。

除了确定波导和驱动机构的物理外型外, 仿真还能够研究应力效应, 例如重复操作引起的不必要的变形或位移。“关于设计的每一个决定都是基于仿真获得的。” Sattari 总结道。

## » 为未来光纤网络铺路

EPFL 团队的目标是利用现有的制造能力生产 MEMS 移相器。最终仿真结果表明, 这是一个稳定、可靠的设计, 可以通过现有的表面微加工制造工艺来实现, 并且总封装面积仅为  $60 \mu\text{m} \times 44 \mu\text{m}$ 。目前该设计已经通过了理论验

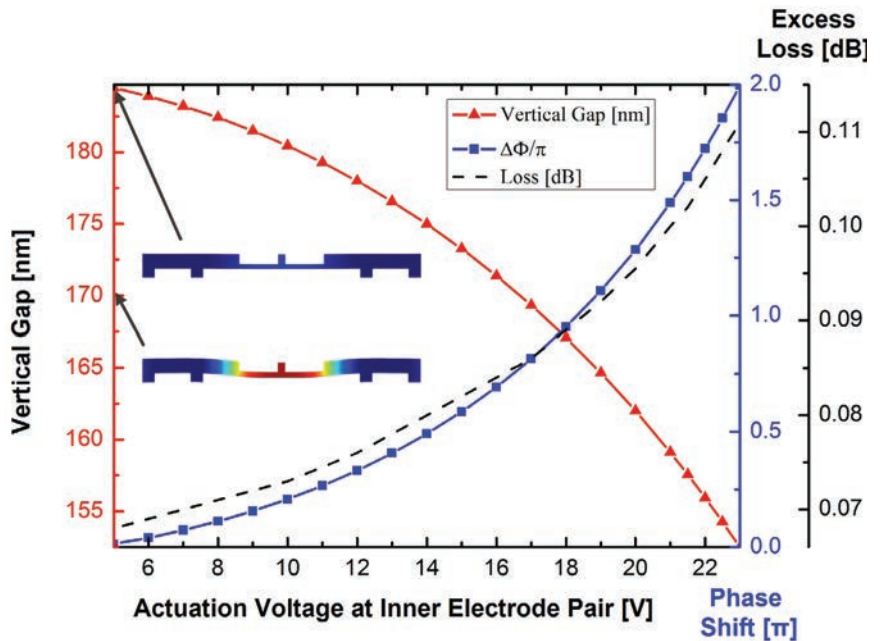
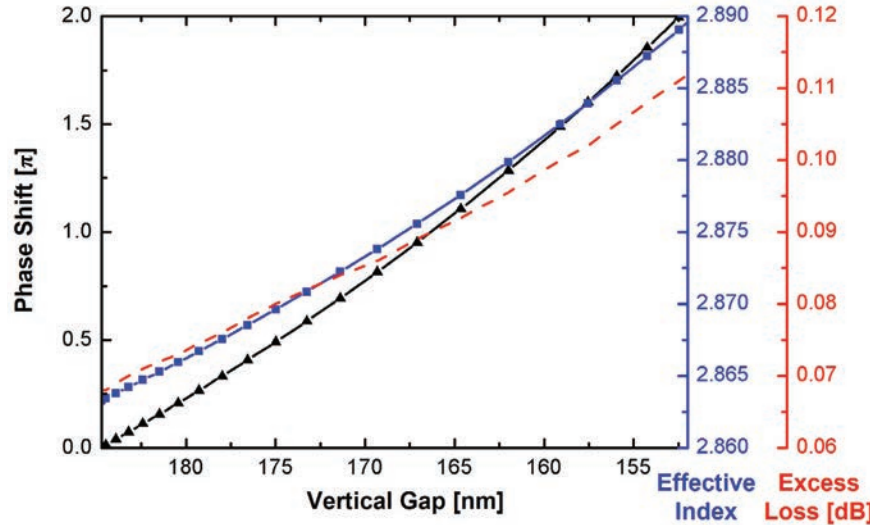


图 4 光学仿真 (上) 确定了耦合器和波导之间的垂直距离, 从而产生光信号所需的相移。机电仿真 (下) 确定了将移动波导耦合器移动到距总线所需的距离时, 施加到 MEMS 装置上的电压。图片由 EPFL 提供, 并获得许可 (CC BY 4.0)。

图注: Phase Shift - 相移; Vertical Gap - 垂直距离; Effective Index - 有效指数; Excess Loss - 额外损耗; Actuation Voltage at Inner Electrode Pair - 内部电极对的驱动电压

证, Sattari 和他的同事期望他们的设计被集成到全球光纤数据网络中。“我们正在为光纤网络的未来铺垫道路, 希望能

够亲眼见证它们用于实际应用中, 这将非常有意义。” Sattari 期待地说。◎

Polar Night Energy, 芬兰

# 利用沙子 储存太阳能 为建筑物供暖

作者 ALAN PETRILLO

arctic circle

FINLAND

Kankaanpää

Tampere

Helsinki

图 1 芬兰国家地图，部分地区位于北极圈内。Polar Night Energy 公司的储热系统目前已安装在 Tampere 市和 Kankaanpää 市。

芬兰的一家初创公司 Polar Night Energy 开发出了一种新技术，利用储存在沙子中的太阳能热量为建筑物供暖。该团队通过热仿真优化了热存储和热分配系统的设计，帮助芬兰减少不可再生的供暖燃料的消耗。

当我们客观地研究自然时，经常需要考虑自然的力量对我们的影响。我们可以坐在办公桌前研究各种形式的传热，但如果我们的脚趾头是冰冷的，可能就会注意力不集中。当我们打开家里和工作场所的暖气时，必须在个人的取暖需求与燃烧石油、天然气、煤炭和生物燃料等化石燃料对全球产生的影响之间取得平衡。人类活动引起的气候变化使人类面临挑战：我们现在应该如何取暖，才能防止地球在未来变得过热？

在寒冷且国土面积较小的芬兰（图 1），初创公司 Polar Night Energy 正在尝试解决这个棘手的问题。在以漫长而黑暗的冬夜闻名的芬兰城市 Tampere，Polar Night Energy 公司正在建立一个可以用储存的太阳能在整个冬季为建筑物 24 小时供暖的系统。他们解决的问题并不止于此。一些复杂的清洁能源技术解决方案通常需要稀有且昂贵的材料，而 Polar Night Energy 公司的储热和分配系统由简单的管道、泵、阀门和沙子组成，这个新颖的系统具有很大的潜力，可以通过一种可持续的、全面的和人性化方式解决全球供暖问题。

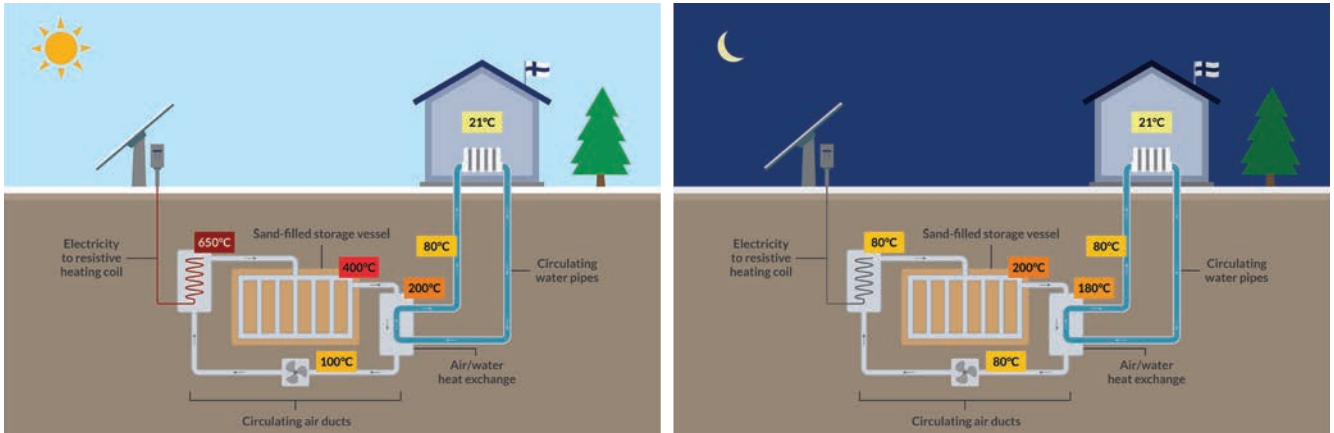


图 2 Polar Night Energy 系统的构成和运行周期示意图。

图注：Electricity to resistive heating coil – 电力传送到电阻式加热线圈；Sand-filled storage vessel – 充满沙子的储热容器；Circulating air ducts – 循环空气管道；Circulating water pipes – 循环水管；Air/water heat exchange – 空气/水热交换。



图 3 Markku Ylönen 以及 Polar Night Energy 公司的一个价格低廉的储热介质样品。



图 4 Eronen (前) 和 Ylönen 正在检查 Polar Night Energy 储热容器的管道系统。

### » 有巨大供暖需求的小国家

大问题需要大型解决方案。21 世纪最大的问题或许就是气候变化。为了解决这个难题，许多国家的政府和组织正在投资开发新技术，以帮助减少化石燃料的使用。这些举措主要集中在可再生能源的开发、分配和储存方面。

“当提到清洁能源时，人们通常想到的是电能。” Polar Night energy 公司的首席执行官 Tommi Eronen 说，“但我们也必须减少热排放。”在芬兰与能源相关的排放中，82%来自住宅建筑供暖排放。Eronen 表示：“如果我们希望实现全球气候目标，就要取代所有这些热排放。”

### » 放眼全球，立足热源

“放眼全球，立足本地”，这个源于 1960 年代的精神理

念在 Polar Night Energy 的创始团队中得以延续。Tommi Eronen 和 Markku Ylönen 是该团队的创始人，他们在读大学时提出一个问题：是否有可能仅利用太阳能工程师们建立一个能源自给自足且低成本的“嬉皮士社区”？毕业后，他们将“嬉皮士社区”项目创立成为 Polar Night Energy 公司，并由 Eronen 担任首席执行官，Ylönen 担任首席技术官。

从最初一个轻松但认真的学生项目开始，Polar Night Energy 公司最终在芬兰城市 Tampere 建立了一个 3 MWh /100 kW 的试点工厂，并在 2020 – 2021 年冬季开始运行。Polar Night Energy 系统利用电能加热空气，空气在换热器中循环将水加热并分配给该市 Hiedanranta 地区的多个建筑 (图 2)。

在该系统中，空气被电能

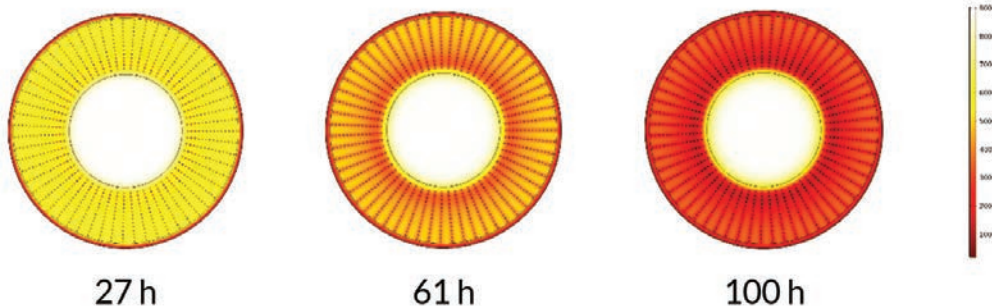


图 5 仿真结果显示了在一个拟定的沙/空气储热容器设计中,温度在 100 个小时内的变化。

驱动的电阻式加热元件加热到超过 600°C, 然后通过一个填满沙子的储热容器内的管网进行循环。在这个过程中, 水被加热后在建筑物供暖系统中循环流动。沙子的储热能力确保了即使在电阻元件冷却时, 循环空气的热量仍然足够使水 (和建筑物) 保持温暖。“我们的系统只有管道、阀门、风扇和电热元件, 并没有任何特殊的组件。” Eronen 解释道。

### » 由沙子制成的热能电池

著名的化学工程师 Donald Sadoway 曾经说过: “如果你想制造一个廉价的电池, 就需要使用泥土。” Polar Night Energy 公司的储热系统也面临着与其他能源基础设施相同的关键性挑战。储能系统必须在人们需要的时间和地点, 以可控的价格提供电能, 这意味着电能的储存和分配与生产同样重要。

为了解决这一关键问题, 现有的基础设施均采用了相似的方法。对于以燃料为基础的供暖, 可以将石油和天然气等燃料储存起来, 并转移到可以燃烧的地方。电网同样能够实现电能的高效分配, 并使用由风能和太阳能等可再生能源产生的电能。然而, 一个棘手的问题是日光和强风属于间歇性能源。在可再生能源输入的高峰期和低谷期, 需要储存能源来维持稳定的电能输出。但是, 即使电池技术最近取得了新进展, 储存电能的成本仍然相对昂贵, 特别是对于大规模的建筑物供暖需求。如果“电池”不是储存电能, 而是储存热能呢?

**“在开始组装所有这些设备和沙子之前, 我们需要借助仿真技术来预测尽可能多的情况。”**

—— TOMMI ERONEN, POLAR NIGHT ENERGY 首席执行官

许多传统的供暖系统通过储存和循环热水来储存和分配热量。Eronen 和 Ylönen 看到了基于水储热的优点, 但同时也意识到这种方式有一定的局限性。Eronen 解释说: “在水变成蒸汽之前, 能添加到水中的热量是有限的。蒸汽可以有效地分配热量, 但对于大规模存储来说, 它并不经济。” 为了避免水储热的缺点, 他们使用了 42 吨的沙子来替代水储存热量(图 3)。当太阳落山后, 沙子中储存的热量会逐渐释放回循环的气流中, 这使得空气具有足够的热量使流过散热器中的水保持稳定的温度。通过这种方式, 即使是在芬兰最黑暗和最寒冷的夜晚, 沙子也能够持续供暖。“沙子储热的能力是水的 4 倍, 并且沙子不仅高效、无毒、方便移动, 而且便宜!” Eronen 介绍道。

### » 简单解决方案背后的复杂分析

成本效率是 Polar Night Energy 公司的基本价值观。

Eronen 说: “当我们决定推行这一想法时, 我们尝试弄清楚该方案的成本。” 在追求以低成本获得高收益的过程中, Polar Night Energy 一直依靠数值仿真技术。Eronen 和 Ylönen 自学生时代起就开始使用 COMSOL® 软件, 这一直是他们设计过程中不可或缺的工具。

例如, Eronen 提到他需要计算一个将为 Tampere 市的更多建筑供暖的扩容储热系统。经团队计算, 为一个拥有 35000 人口的地区供热, 需要一个高 25 米、直径 40 米的填满沙子的储存罐。他们是如何得出这些尺寸的? “所需材料的大致数量实际上很容易计算, 因为我们知道 1 立方米的沙子可以储存多少热量。” Eronen 解释道, “我们还必须确定在沙子和空气循环系统(图 4) 之间有效传热所需的空空间, 这一点更难做到。我们使用了 COMSOL® 软件进行模拟并评估了不同的设计方案。”

多物理场仿真软件帮助 Polar Night Energy 团队完成了他们的热交换器设计(图 5-图 6)。“如果建造一个由加热管围绕的高温沙芯会怎么样? 我们建立了一个特殊的模型来探索这个设计理念。” Eronen 说道。通过在 COMSOL Multiphysics® 软件中对流体流动和传热效应

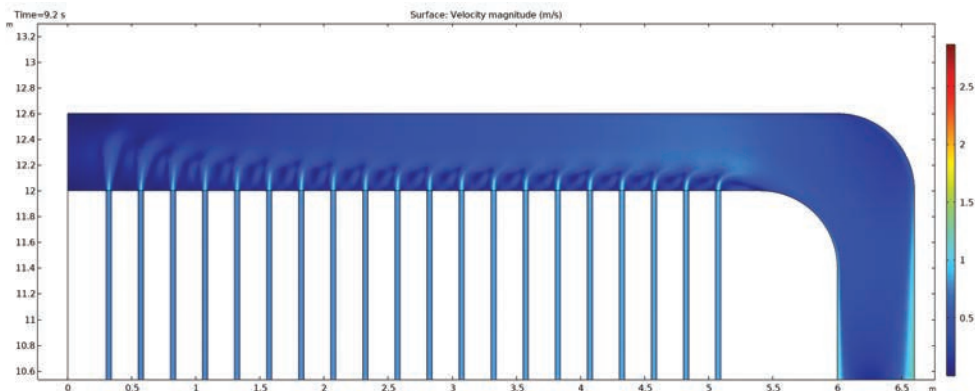


图 6 储沙容器内管道系统的自然对流效应的模拟图。



图 7 Polar Night Energy 公司在芬兰城市 Tampere 安装的传热系统的一部分。左边的垂直管道是热交换器的一部分，右边的电阻式加热元件包裹着白色绝缘材料。这些组件之间是空气循环径向鼓风机。

进行模拟，Polar Night Energy 团队对换热器设计的相对优点和缺点进行了量化。“仿真结果证实，‘热芯’设计能够在很长时间内储存热量，但对于我们预定的操作周期来说，更合理的做法是将热空气管道均匀地分布在整個储沙容器中。”Eronen 解释说。

Polar Night Energy 公司的沙储热系统的规模之大，使得仿真软件不可或缺。“我们不可能建造全尺寸原型来测试我们所有的想法。在开始组装所有这些设备和沙子之前，我们需要借助仿真技术来预测尽可能多的情况。”Eronen 说道，“这对我们来说是非常必要的。”

## » 将新理念应用于现有的基础设施

通过将储热任务与生产和分配热能分开，Polar Night Energy 公司的储热系统变得更加高效且适应性强，使用他们的填沙式储热和传热系统改造现有的供暖基础设施具有很大的潜力（图 7）。

的时候分配能量。

## » 芬兰的今天，世界的未来

自从 Tampere 市的储热系统在 2020 - 2021 年冬季开始运行以来，Polar Night Energy 公司团队一直在收集数据，并与他们的仿真模型进行比较。“我们的模拟已经过验证，非常准确，这是非常鼓舞人心的。”Eronen 总结道。Polar Night Energy 公司继续在当地推行他们的理念，并计划在全球范围内采取行动。

这项为芬兰漫长的寒夜带来温暖的技术，同时也可以为世界上其他地区提供更好的能源管理选择。价格低廉的储热技术不仅可以帮助工业界和城市收集被浪费的热能，还可以平衡风能和太阳能产出的不一致性。尽管 Polar Night Energy 公司期望与潜在客户直接合作，但他们也意识到，未来的挑战太大，他们无法独自应对。

“我们想授权这项技术。如果你经营一家发电厂，请与我们联系。”Eronen 笑着说。在一个更严肃的问题上，他补充说：“我们必须摆脱所有类型的燃烧，甚至是生物燃料燃烧。我们需要保护和恢复森林，这样它们才能继续从空气中清除碳。气候变化发生得如此之快，希望我们的理念能够尽快地传播出去。”

拥有近 25 万人口的芬兰内陆工业城市 Tampere 是这一新技术的理想试验场。“像许多欧洲城市一样，Tampere 已经有一个区域供暖系统，通过水循环为整个街区供暖。”Eronen 介绍说，“这使我们能够迅速地将许多建筑的供能能源转变为可再生热源。”Polar Night Energy 公司在 Tampere 的试点基地还可以利用已有的电网电力，以及新兴太阳能电池板产生的电能。可靠的储热系统使该城市能够以最低的成本发电或采购电能，并在最需要

MED Institute, 美国

# 核磁共振检查中 医疗器械的射频感应发热

植入患者体内的医疗器械应该安全且与核磁共振成像检查环境兼容。MED Institute 是一家医疗设备研发机构，他们正在使用建模与仿真来分析医疗器械在核磁共振成像系统中的射频感应发热现象。

作者 **DIXITA PATEL**

全球每年进行的核磁共振成像 (MRI) 扫描超过 8000 万次。核磁共振成像系统有许多不同的形状和尺寸，并通过其磁场强度进行分类。核磁共振成像扫描仪能够产生从低于 0.55T 到 3T 及以上范围的磁场，T (特斯拉) 是静态磁场强度的单位。核磁共振成像系统产生的强磁场会对植入了金属医疗器械的患者构成许多安全隐患。

大功率磁体产生的力和扭矩可能会引起植入物移位，并可能会对患者造成伤害。此外，核磁共振系统中用于空间定位的梯度线圈可能会引起梯度感应发热、振动、对组织的刺激，以及植入式医疗器械故障。核磁共振系统中的大功率射频线圈可以使导电的植入物产生电磁共振，即“天线效应”，从而导致射频感应发热，并有可能烧伤患者。

MED Institute 是一家为医疗设备行业提供全面服务的合约研究组织，它正在使用多物理场仿真技术深入研究植入式医疗器械产生的射频感应发热对进行核磁共振成像扫描的病人的影响。

## » 医疗设备的标准测试方法

MED Institute 在产品的整个研发周期内为客户提供技术支持，其核磁共振安全团队帮助制造商评估医疗器械在核磁共振环境中的安全性和合规性，并进行实物测试 (图 1)。为了确保这些器械的安全性和使用有效性，该团队与负责监督医

疗产品开发的美国食品和药物管理局 (FDA) 一直保持密切合作。此外，团队还遵循美国测试与材料协会和国际标准化组织 (ISO) 标准。他们参照 ASTM F2182 标准来测量凝胶体模内医疗植入物的射频感应发热 (图 2)，以及遵循 ISO/TS 10974 标准来评估核磁共振成像时的电动有源植入式医疗器械。

用于测试的凝胶体模是一个装满了导电凝胶的长方形丙烯酸容器，其性能近似普通人体组织的热和电特性。测试时，将体模放置于核磁共振扫描仪射频线圈内的患者检查床上，并将光纤温度探针 (直径 1 毫米) 的一端连接到医疗器械上，然后将探针浸入凝胶中，用于测量核磁共振扫描过程中被测医疗器械的温度变化。这类测试的使用率很高，但存在一些潜在的问题，例如凝胶体模内部的移动会给测试带来不确定性，以及探头位置放置不正确会导致测试无效。此外，不同的材料具有不同的磁化率，可能会产生磁力的问题。

为了帮助解决这些问题，MED Institute 团队使用仿真来替代物理测试。MED Institute 的核磁共振安全评估和工程仿真团队负责人，产品工程师 David Gross 博士，带领团队利用仿真来深入理解一些基于物理场的问题。他介绍道：“仿真能为我们提供测试体内的任意三维温度场分布，我们不会受限于离散的探针测量点，也不必担心设备的测量精度或测试中探针放置位置的不确定性”。

MED Institute 团队具有封闭式核磁共振系统的仿真经



图 1 MED 研究所的工程师在进行实物核磁共振测试，以评估医疗设备在核磁共振环境中的安全性。

验，在该系统中，患者被放置在一个狭小的通道内。目前，他们使用仿真技术对一个开放式核磁共振系统（图 3）进行了相同的分析。开放式系统具有更开阔的物理通道，正如 MED Institute 网站上解释的那样，更有利于对“儿童、肥胖人士、老年患者和幽闭恐惧症患者进行检查”。

### 射频感应发热的多物理场仿真

借助 COMSOL® 多物理场仿真软件，MED Institute 能够评估植入物因射频感应

而导致的温度上升情况，并比较产品系列中不同尺寸和结构的设备的测试结果，以确定极端情况下设备所对应的设置。MED Institute 的分析人员使用 COMSOL® 的附加产品 CAD 导入模块导入客户设备的 CAD 文件，并使用 RF 模块和传热模块将电磁学与瞬态传热相耦合，模拟射频感应发热。在分析电磁学时，RF 模块能够使用麦克斯韦方程求解模型内受电磁场影响的点的波动方程，这一过程是在稳态频域的研究节点下完成的，然后与瞬态传热相耦合，并通过传热模块求解热传导方程。

MED Institute 将一个膝关节植入物的 CAD 文件导入了 COMSOL® 软件，得

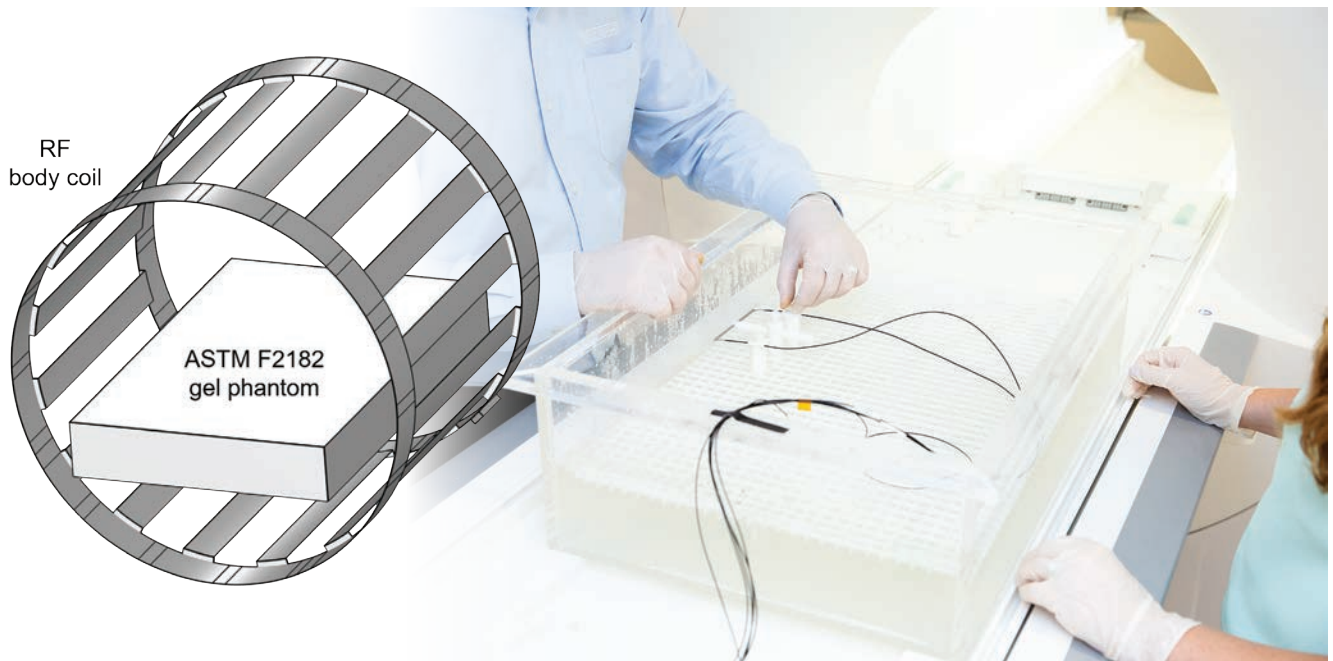


图 2 模拟测试中使用的 ASTM F2182 标准装置（左图）以及在核磁共振成像实物测试中使用的 ASTM F2182 标准装置（右图）。

图注：RF body coil – 射频体线圈；gel phantom – 凝胶体模

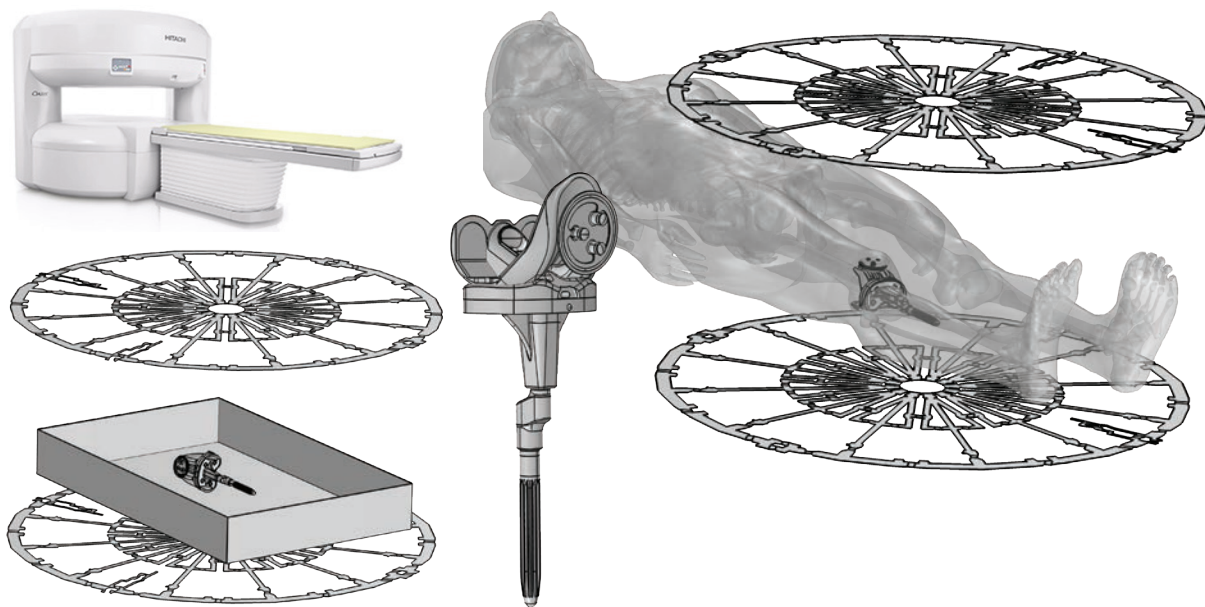


图3 一个开放式核磁共振系统(左),包含 IT'IS 基金会的杜克虚拟人体模型(右上)的 RF 体线圈, ASTM 凝胶体模中膝关节植入物的 RF 体线圈(左下),以及膝关节植入物的 CAD 模型(中下)。

到的几何结构包括一个股骨延长杆、胫骨托盘、股骨托盘和其他部件。这些部件尺寸不同,可以通过不同的方式组装,并且患者也可能在不同的核磁共振系统中进行检查,而不同的核磁共振系统会产生不同的电磁场。由于这些变量存在大量的排列组合,通常难以确定哪种配置会产生最坏情况的射频感应发热现象。

“这就是使用仿真的意义所在。你可以把精力集中在能够改变特定植入物共振的主要因素上。”Gross 说道。通过使用 COMSOL® 软件, MED Institute 能够更好地了解达到共振的相对边界,以及该器械在不同电磁场下的表现。这有助于团队进行敏感性分析,从而能够测试引起共振变化的原因,例如修改延长杆的直径或植入物的其他组件。在这个仿真案例中,为了确定可能产生最坏情况的器械尺寸和射频频率,他们进行了数百次模拟。

在仿真验证过程中,使用极端情况分析是至关重要的,因为它允许制造商为各种设备测试不同的影响因素,比如确定哪种尺寸带来的影响最多,而不是对一种产品的每个变体进行物理测试。“进行多次物理实验会产生高昂的成本并且费时,特别是当你考虑到使用一台核磁共振扫描仪每小时的成本时。”Gross 表示。

如图4所示,1.2 T 开放系统(左上)与1.5 T 非开放系统(右上)的凝胶体模中的电场有很大不同。MED Institute 团队对

这两个系统中的膝关节植入物都进行了仿真,结果显示在延长杆末端产生了不同的共振和最大温升(下)。

通过使用 COMSOL® 软件, MED Institute 团队能够更深入地了解器械在电磁场下的性能表现。利用仿真结果,团队就能确定温度探针应该放置在哪里,同时在实际的核磁共振系统中对该器械进行物理测试,以获得温度上升的结果。

### » 对核磁共振安全评估模型进行 FDA 资格认证

MED Institute 此次使用仿真测试医疗器械的射频感应发热的经验,激发了他们的灵感。他们希望开发一种有应用前景的、可以加速产品开发周期的新仿真工具。MED

Institute 团队向 FDA 的医疗设备开发工具 (MDDT) 项目提交了该仿真工具,该项目由 FDA 对新工具进行评估,旨在促进医疗产品和研究。正如 FDA 网站上所说的,“MDDT 项目是 FDA 对医疗设备赞助商在进行医疗设备开发和评估时,选择使用的工具进行鉴定的一种方式。”只要评估合格, FDA 即承认该工具可以作为正式的医疗设备研发工具使用。

2021 年 11 月, MED Institute 获得了 FDA 对其医疗器械研发工具“医疗器械的虚拟核磁共振安全评估”的认证。这个评估过程涉及使用多物理场仿真来测试医疗器械与核磁共振环境的相互作用。使用该工具对核磁共振系统的射频线圈、ASTM



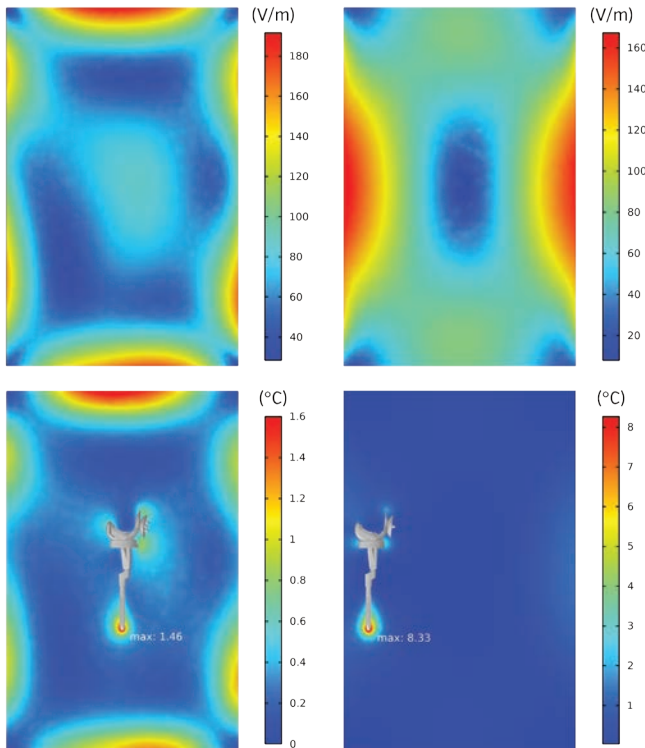


图 4 凝胶体模中的膝关节植入物在开放系统和非开放系统中的仿真结果对比。

凝胶体模和放置在凝胶中的医疗器械进行建模，然后通过仿真分析电磁学以及器械周围产生的热量。

当器械完成测试后，将根据 ASTM 2503 标准为器械提供标签，如果是电动有源植入器械，则按照 ISO 10974 标准来提供。这些标签被贴在器械包装上和使用说明中，以便进行核磁共振检查的技术员或放射科医生能够看到患者的植入器械的相关信息。

“使用我们的医疗器械研发工具，不仅可以优化物理测试的效果，甚至在某些情况下可以用仿真取代物理测试。” Gross 表示。

## » FDA 对建模和仿真的支持

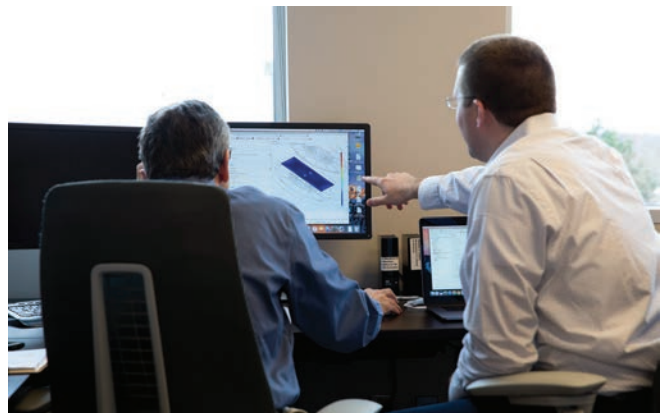
多年以来，MED Institute 利用 COMSOL 多物理场仿真软件评估了许多医疗器械的核磁共振安全性。结果表明，COMSOL® 是一个强大而高效的仿真平台，可以解决复杂的多物理场问题。“这会产生直接且积极的结果，因为依靠仿真，我们的客户能够以更快的速度和更低的成本对其产品进行评估，甚至无需将实际产品寄给我们来进行射频感应发热测试。” Gross 说道。

**“使用我们的医疗器械研发工具，不仅可以优化物理测试的效果，甚至在某些情况下可以用仿真取代物理测试。这会产生直接且积极的结果，因为依靠仿真，我们的客户能够以更快的速度和更低的成本对其产品进行评估。”**

—— DAVID GROSS, MED Institute MRI 安全评估和工程仿真总监

FDA 一直支持计算建模，并愿意评估和接受仿真数据以代替实物测试。MED Institute 有幸与 FDA 合作多年，为患者谋取福利。“对于医疗器械赞助商而言，让

他们知道他们获得了 FDA 的鼓励和支持是很重要的。这表明 FDA 愿意投资并相信建模和仿真的力量。” Gross 总结道。◎



MED Institute 使用 COMSOL Multiphysics® 软件加速客户的产品研发进程。

Eden Tech, 法国

# 降解微污染物的 新型污水处理设备

全球湖泊、河流和溪流中的微污染物日益增多，许多传统的污水处理厂并未配备能够去除这些具有潜在危害的化学残留物的设备。位于法国巴黎的科技公司 Eden Tech 正在使用多物理场仿真设计开发一种污水处理设备，用于解决这一新兴问题。

作者 RACHEL KEATLEY

1985 年的一部美国冒险动作电视剧 MacGyver® 讲述了秘密特工 Angus MacGyver 利用手头物品解决生活问题的故事。例如，他在剧中利用废旧冰

箱零件制作了一个隔热罩，还利用糖果包装纸制作了鱼饵。三十多年过去了，这部剧仍然具有现实意义。动词 MacGyver，是指以临时的或创造性的方式设计物品，于 2015 年被收录入《牛津英语词典》。

尝试测试一下你的 MacGyver 技能：如果有人给你一些光盘，你会用它们做什么？艺术反光墙，马赛克装饰品或者一个风铃，还是一个小型污水处理设备？

这正是 Eden Tech 公司的工程师和研究团队正在做的事情。Eden Tech 是一家专门从事微流体技术开发的公 司，其研发部门 Eden Cleantech 正在开发一种用于降解废水中日益增多的微污染物的小型节能水处理系统。为了分析使用光盘制成的 AKVO（以拉丁词语 aqua 命名，意为“水”）系统的性能，Eden Tech 使用了多物理场仿真技术。

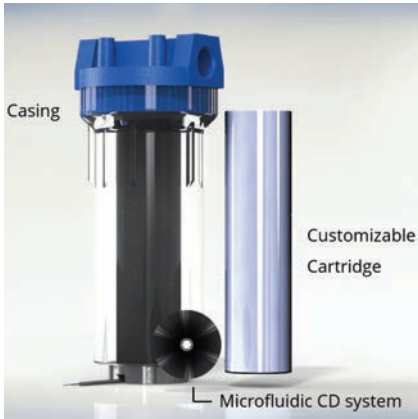
## » 新兴污染物

“微污染物进入污水的方式有很多种，人类的日常活动导致这些微型化学物质在世界各地的污水中增多。例如，当我们用肥皂洗手、用清洁剂擦拭水槽或者进行药物冲洗时，各种各样的化学物质都会被排进下水道并最终进入污水系统，其中的一些化学物质被归类为微污染物，或新兴污染物。除了生活垃圾以外，农业污染和工业废弃物也是导致下水道中微污染物增多的原因。” Eden Tech 公司的高级化学工程师兼首席产品官 Wei Zhao 介绍道。

然而，许多传统的污水处理设备（图 1）并不能去除这些污染物。因此，它们经常被重新排入各类水体，包括河流、小溪、湖泊，甚至饮用水源中。尽管我们尚未完全了解微污染物对人类和环境健康构成的风险，但世界水体中日益增多的污染物令人担忧。



图 1 大多数传统污水处理设备无法去除微污染物。



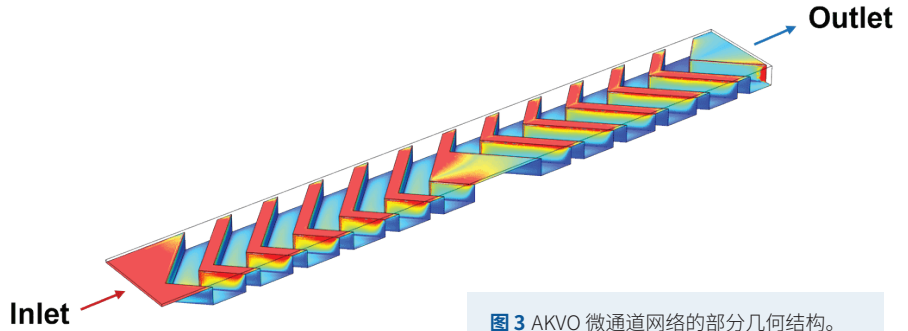
**图 2** 标记了所有组件的 AKVO 系统。  
图注：Casing – 套筒；Customizable Cartridge – 可定制的光盘盒；Microfluidic CD system – 微流体通道光盘系统

随着这个问题发展的日益严重，Eden Tech 开始着手研究解决方案，于是 AKVO 诞生了。每个 AKVO 的光盘芯设计为直径 15 cm，厚度 2 mm，每个光盘盒由数量不等的光盘堆叠而成，组合成为一个小型工厂。一个 AKVO 光盘芯每天处理 0.5 ~ 2 m<sup>3</sup> 污水，这意味着由 10000 个光盘芯组成的 AKVO 系统完全能够满足市政污水的日常处理需求。这种由光盘制成的设备是如何净化污水的？

### » 一种可持续的污水处理方法

每个 AKVO 系统（图 2）由一个可定制的光盘盒组成，其中装满了堆叠的光盘，每个光盘上都刻蚀有微通道网络。通过水在微通道网络中的循环流动去除污水中的有害物质，如微污染物。这些微通道网络非常节能，仅需一个小型泵就可以循环和清洁大量的水。AKVO 系统的光盘盒可以轻松更换，由 Eden Tech 负责对其进行回收利用。

AKVO 系统结合了光催化和微流体技术，是一项革新性的设计。光催化是一种高级氧化工艺，能够快速、有效地去



**图 3** AKVO 微通道网络的部分几何结构。  
图注：Inlet – 入口；Outlet – 出口

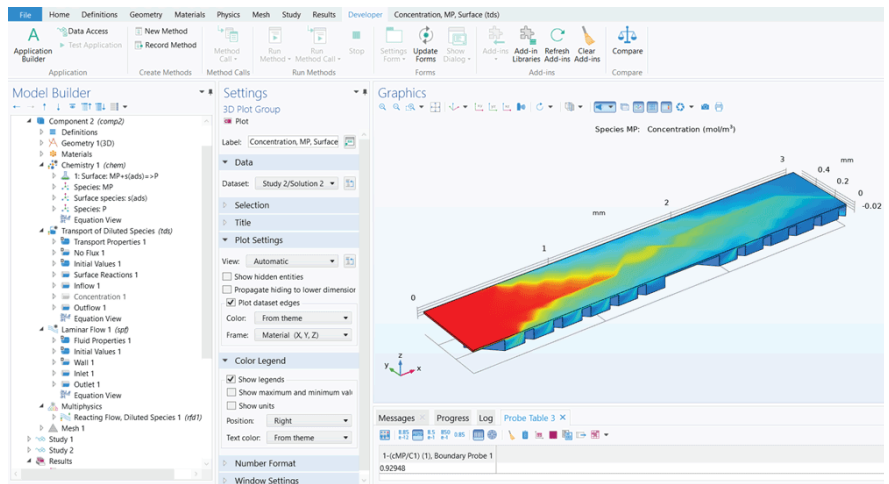
除污水中的微污染物。与其他光催化工艺相比，AKVO 系统由光源驱动，具有更好的安全性和可持续性。在光催化过程中，光被具有产生电子空穴对能力的光催化剂吸收，产生能够与目标污染物反应并将其降解的羟基自由基。将光催化和微流体技术相结合进行废水处理是前所未有的。“这是一个非常艰巨的项目，我们希望开发一种创新的方法，以一种既环保又高效的方式处理污水。” Zhao 表示。AKVO 目前的设计实现来之不易，因为 Zhao 和他的团队在开发过程中面临过许多设计挑战。

### » 克服设计挑战

AKVO 系统在运行过程中，化学试剂

（催化剂）和污水通过它的微通道壁被分散。催化剂（本例中为二氧化钛）的作用是与微污染物发生反应并在过程中将它们去除。然而，AKVO 系统中的快速流动使这一过程变得复杂。“最大的问题是，当我们将化学试剂放入通道壁内时，微通道中流体的快速流动使污水中的微污染物无法与试剂有效反应。” Zhao 解释说。为了增加微污染物与固定化学试剂之间的接触，Zhao 和他的团队选择对 AKVO 的微通道网络采用交错的人字形微混合器设计（图 3）。

为了分析支持微污染物降解化学反应的人字形微混合器设计的性能，Zhao 选择使用 COMSOL Multiphysics® 软件进行仿真。



**图 4** 使用 COMSOL Multiphysics® 软件中的化学、稀物质传递、层流、反应流和稀物质接口进行仿真分析。

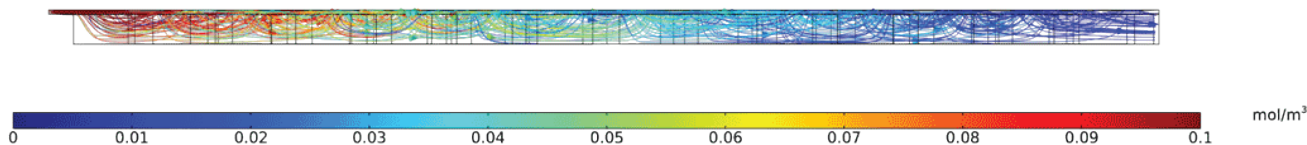


图 5 ESA 模型的模拟结果。

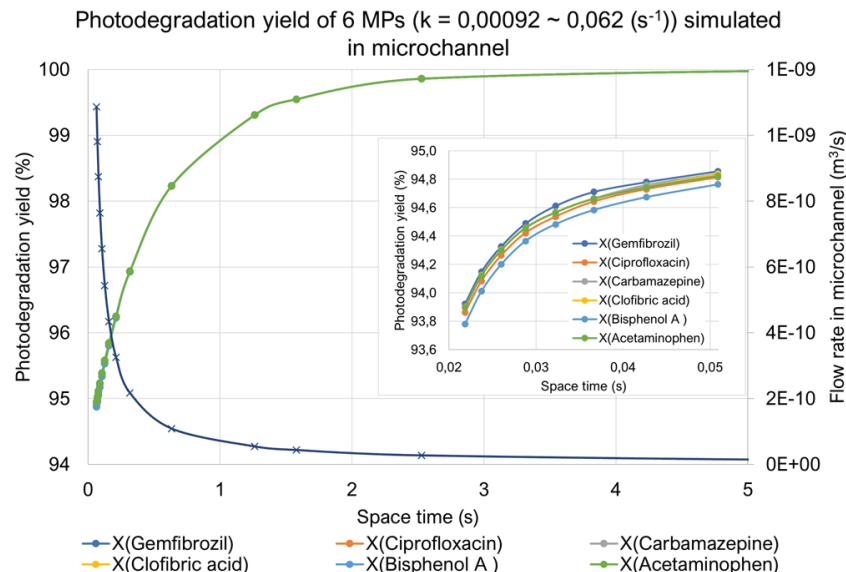


图 6 人字形微混合器设计对 6 种不同微污染物的光降解性能比较。

图注：Photodegradation yield of 6 MPs simulated in microchannel – 在微通道中模拟的 6 种微污染物的光降解产量；Space time – 时间；Flow rate in microchannel – 微通道中的流速；Gemfibrozil – 吉非罗齐；Ciprofloxacin – 环丙沙星；Carbamazepine – 卡马西平；Clofibric acid – 氯贝酸；Bisphenol A – 双酚 A；Acetaminophen – 对乙酰氨基酚

### » 模拟微污染物降解中的化学反应

Zhao 使用 COMSOL® 多物理场仿真软件构建了两个不同的模型 (图 4), 分别命名为显性表面吸附 (ESA) 模型和转换表面浓度 (CSC) 模型。这两个模型均考虑了化学和流体现象。

在这两个模型中, Zhao 发现流体在通过 AKVO 人字形微混合器结构时会产生涡流, 这使得微污染物和化学试剂具有更长的反应期, 并增强了各流体层之间的物质传递。然而, ESA 模型的模拟结果 (图 5) 显示, 该设计仅处理了约 50%

的微污染物, 低于 Zhao 的预期。

与 ESA 模型不同, 在 CSC 模型中假设没有吸附限制, 因此, 只要微污染物到达催化剂表面, 就会发生反应, 已有的文献对此进行过讨论。Zhao 使用 CSC 模型分析了这种人字形微混合器设计对 6 种不同微污染物的降解, 包括吉非罗齐、环丙沙星、卡马西平、氯贝酸、双酚 A 和对乙酰氨基酚 (图 6)。该模型对微污染物的处理达到 95% 以上, 符合 Zhao 的预期。

“我们对 COMSOL Multiphysics®

软件的仿真结果非常满意。接下来我们将专注于对 AKVO 原型进行实验测试。预计到 2022 年初, 我们将制作完成第一个原型。” Zhao 介绍道。该原型最终将在法国南部的医院和水处理站进行测试。

仿真技术在该项目中为 Eden Tech 团队节省了时间和资金。开发像 AKVO 这样的微流体系统原型的成本很高。在每张光盘上蚀刻微通道网络, 需要一个微通道光掩模版。一个光掩模版的制造成本约为 3000 欧元 (约 20000 元人民币)。因此, 确保这些系统在制造之前运行良好非常重要。“COMSOL Multiphysics® 软件确实帮助验证了我们的模型和设计。” Zhao 表示。

### » 微污染物处理的先驱

2016 年, 瑞士推出立法强制要求新设计的污水处理设备能够去除污水中的微污染物, 目标是去除瑞士 100 多个污水处理厂中 80% 以上的微污染物。在瑞士的引领下, 许多其他国家也开始考虑如何处理他们的水道中日益增多的微污染物。AKVO 系统有可能提供一种小型、环保的方式, 帮助减缓这个正在发生的问题。

下次当你准备扔掉旧的光盘或任何其他家居用品时, 可以思考一下: Mac-Gyver 会怎么做? 或者, Eden Tech 会如何利用这些物品? 你可能正握着他们下一个创新设计的原材料。☺

Hellenic Cables, 希腊

# 海底电缆设计的仿真优化

越来越多的海上风电场开始将风力发电机建在远海域，这对海底电缆的设计提出了更高的要求。这些电缆需要延伸到更远的距离、布置在更深的水域，并且将可再生的电能源源不断地输送到千家万户。为此，希腊 Hellenic Cables 公司使用有限元仿真来分析和评估地下电缆和海底电缆的设计。

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

海上风电行业是全球发展最快的电力能源产业之一，这是由于风力在开阔的海洋上比在陆地上更强、更稳定。全球对能源的需求预计将在十年内增长 20%，其中大部分需求将由风能等可再生能源提供。

海上风电场（图 1）由发电机网络组成，其中包括将风电场连接到岸上并为电网基础设施供电的电缆（图 2）。许多海上风电场由地基式结构组成，如单桩和其他类型的固定地基式风力发电机。由于电缆必须埋在海底，因此这些结构

的建造成本很高，而且难以在深海环境中安装。在浅海区，电缆更容易安装和维护。

海上风电未来发展的关键是漂浮式海上风电场，其电缆直接铺设在海床上。当海岸附近的风电场变得越来越多时，漂浮式风电场将是一个很好的解决方案，而且它们还可以利用发生在更远海域的更大、更强的风。

## » 柔性海底电缆的设计要素

随着海上风电行业的不断发展，开

发出能够安全、高效地将风电场连接到电网的电缆需求也在增长。

安装或修复海底电缆可能耗资数十亿美元，因此电缆设计人员必须确保设计出的电缆能够在海底条件下按预期运行。如今，这些设计工作通常是在电磁仿真的帮助下完成的。电缆仿真结果通常采用国际标准进行验证，但这些标准已跟不上不断进步的计算和仿真能力。希腊 Hellenic Cables 公司及其子公司 FULGOR，使用有限元方法来分析他们的电缆设计，并与试验测量结果进行比

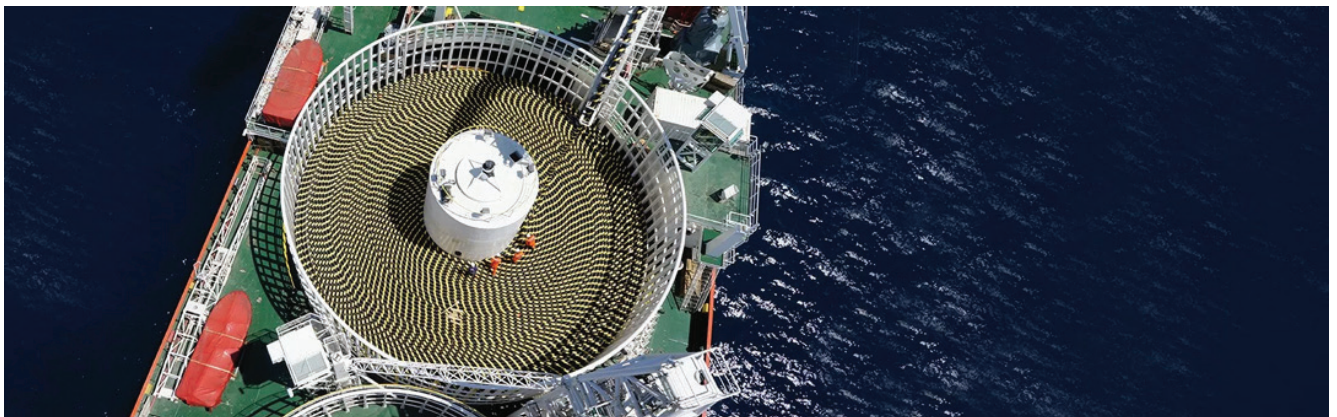


图 1 一艘正在进行海底电缆安装的船只。

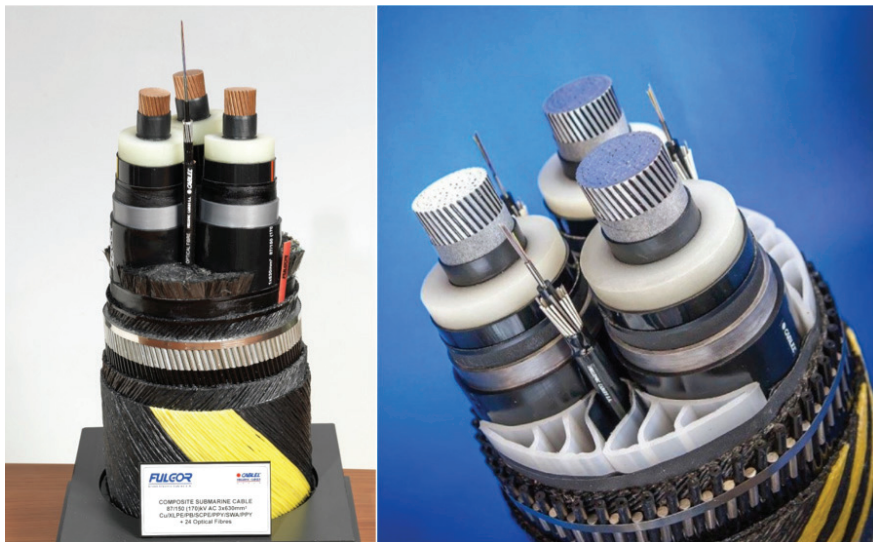


图 2 Hellenic Cables 提供的三芯 (3C) 海底电缆示例。

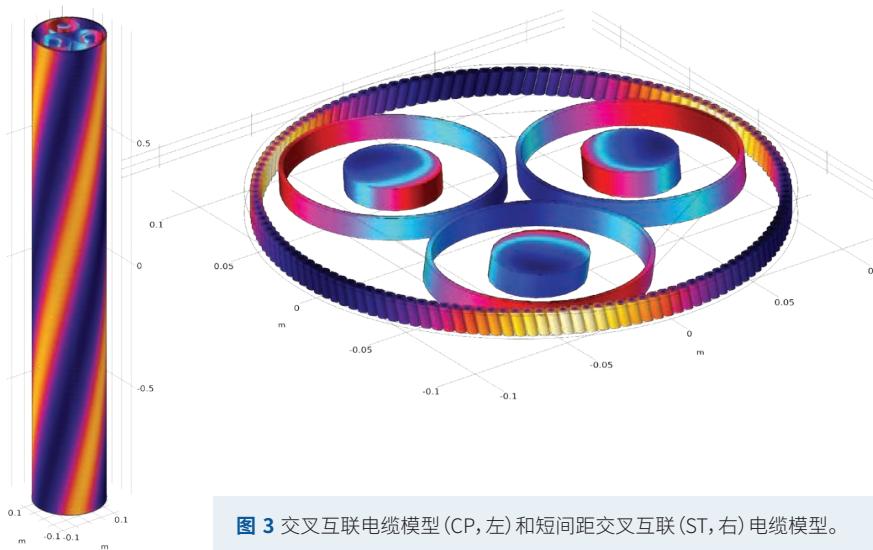


图 3 交叉互联电缆模型 (CP, 左) 和短间距交叉互联 (ST, 右) 电缆模型。

较, 通常能够获得比使用国际标准更好的结果。

### » 计算电缆损耗的最新方法

国际电工委员会 (IEC) 制定了各种电缆标准, 包括用于计算电缆损耗和额定电流的 60287 1-1 标准。但是, 在这个标准中使用的公式高估了电缆损耗, 尤其是三芯海底电缆的铠装损耗, 电缆设计人员不得不采用新的方法来进行这些分析。Hellenic Cables 的研究团队也

意识到了这一点, 其数值分析团队的负责人 Dimitrios Chatzipetros 说: “使用更准确和更真实的模型, 会带来更大的收益。” 新方法能够减小电缆截面, 从而降低成本。

电缆是一种复杂的设备, 其几何结构由三根以某一绞距螺旋绞合的主线芯, 和数百根以第二或第三绞距绞合的其他线缆 (屏蔽线或铠装线) 组成, 这使得在仿真过程中生成网格和求解电磁场有一定困难。“这是一个复杂的三维问

题, 并且因为其中一些部件具有铁磁性, 设置材料属性极具挑战性。” Hellenic Cables 研发部门的副总工程师 Andreas Chrysochos 解释道。

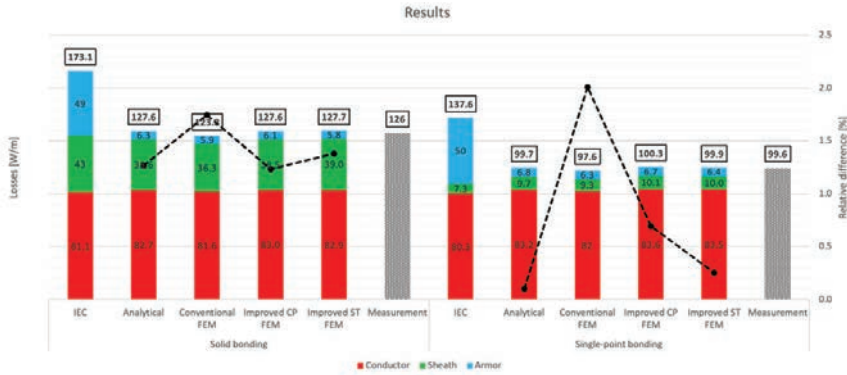
Hellenic Cables 团队首先使用有限元法对长度为 30 ~ 40 m 的完整电缆段进行了模拟。事实证明, 这样一个巨大的数值模型, 只有在超级计算机上才能完成求解。通过改用长度等于电缆交叉互联间距的周期性模型, 该团队将模型尺寸从 40 m 减小至 2 ~ 4 m。接着, 他们进一步引入了短间距交叉互联周期性, 将模型的周期长度从米级减少至厘米级, 使求解变得更加容易 (图 3)。

尽管有限元法为电缆分析带来了重大的改进, 但 Hellenic Cables 仍需说服客户, 使他们相信经过验证的数值仿真结果比当前 IEC 标准提供的结果更符合实际。虽然客户通常对 IEC 60287 标准高估了电缆损耗这一事实有所了解, 但可视化的仿真结果以及与实际测量值的对比大大增强了客户的信心 (图 4)。

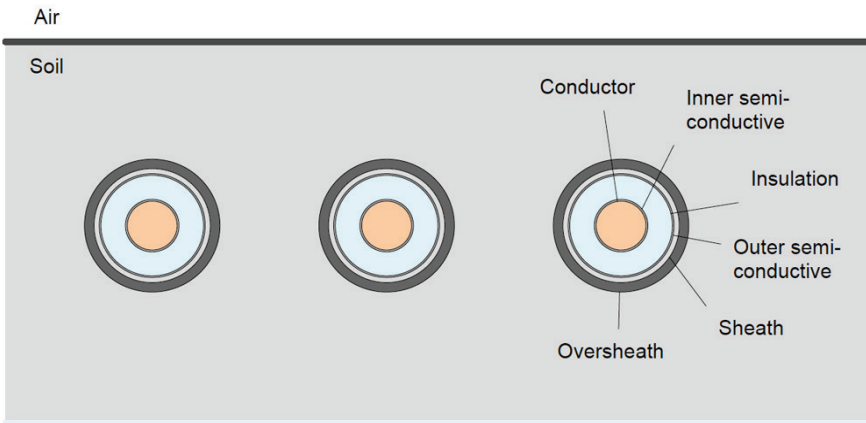
### » 电缆系统的有限元仿真

在设计电缆系统时, 电磁干扰带来了一些挑战, 尤其是电缆导体和护套之间的电容和电感耦合。一方面, 在计算额定电流时, 工程师需要考虑额定工况下电缆护套中的功率损耗。另一方面, 电缆护套上的过电压需要在可接受的范围内, 才能满足健康和安全标准。

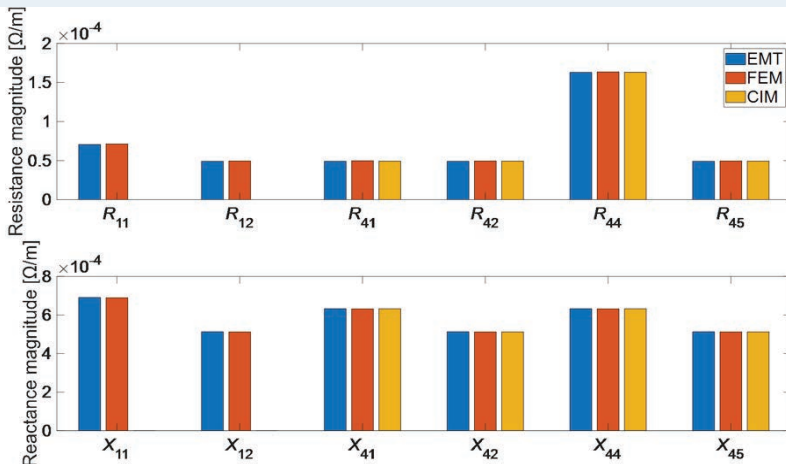
计算电容和电感耦合主要有三种方法。第一种是复阻抗法, 该方法计算了电缆系统的电流和电压, 同时忽略了其容性电流, 其中还假设以等效导体表示接地回路。另一种常用的方法是使用电磁瞬态程序软件, 通过时域和频域模型分析电力系统中的电磁瞬态过程。



**图 4** 基于特定电缆几何形状的两端接地方式和单端接地的计算结果，包括使用 IEC 60287 (标准方法)、分析计算、传统有限元法、改进的交叉互联有限元法 (基于交叉互联模型) 和改进的短间距交叉互联有限元法 (基于短间距交叉互联模型) 计算的数值和测量值。  
图注: Solid bonding – 两端接地; Single-point bonding – 单端接地; Losses – 损耗; Analytical 解析值; Conventional FEM – 传统的有限元法; Improved CP FEM – 改进的交叉互联有限元法; Improved ST FEM – 改进的短间距交叉互联有限元法; Measurement – 测量值



**图 5** 电缆几何模型。  
图注: Conductor – 导体; Inner semi-conductive – 内芯半导体层; Insulation – 绝缘体; Outer semi-conductive – 外部半导体层; Sheath – 护套; Oversheath – 外护套; Soil – 土壤; Air – 空气



**图 6** 电磁瞬态法 (EMT)、有限元法 (FEM) 和复阻抗法 (CIM) 的计算结果比较。  
图注: Reactance magnitude – 电抗大小; Resistance magnitude – 电阻大小

第三种为有限元法，它也是 COMSOL Multiphysics® 软件的基础。Hellenic Cables 的团队使用 COMSOL® 多物理场仿真软件和其附加的 AC/DC 模块计算了导电介质中的电场、电流和电势分布。“对于这类问题，AC/DC 模块及其内置的求解器非常强大和高效。” Chrysochos 介绍说。

Hellenic Cables 团队在分析额定电压为 87/150 kV，横截面积为 1000 mm<sup>2</sup> 的地下电缆系统时，比较了复阻抗法、电磁瞬态法和有限元法 (使用 COMSOL Multiphysics® 软件) 这三种方法的计算结果 (图 5)。他们对电缆系统导体内部和周围的磁场和感应电流密度分布进行了模拟，并考虑了与外部电路的连接方式。三种方法的计算结果显示，对于三种不同的电缆金属护套接地方式：两端接地、单端接地、交叉互联接地，电缆系统均保持了良好的一致性 (图 6)。这表明，当同时考虑电容和电感耦合时，有限元法可以用于模拟所有类型的电缆配置和安装方式。

### » 光明及万物互联的未来

Hellenic Cables 团队计划进一步完善他们开发的所有电缆模型，他们还对高压直流电缆进行了研究，其中涉及交联聚乙烯绝缘材料和电压源型换流器技术。对于远距离输电系统，高压直流电缆的成本更低。

就像为海上风电场提供能源的风一样，电缆系统无处不在。尽管我们并不会经常看到，但是它们始终在运行着，确保我们的世界电能充足并且万物互联。优化海底和陆地电缆的设计是建设可持续未来的重要组成部分。🌐

Alfred Wegener Institute, 德国

# 使用黏弹性模型 预测格陵兰岛的 冰川消融

格陵兰岛东北部的冰川系统中含有的水足以使全球海平面上升 1 米以上, 而且它向海洋排放冰块的速度一直在加快。为了更好地理解和预测这一排放过程, 德国 Alfred Wegener Institute 的研究人员开发了一个改进的黏弹性模型, 用于模拟海洋潮汐和冰川底部的地形地貌对冰川流动的影响。

作者 ALAN PETRILLO

如果你站在冰川的附近, 或许会认为它看上去和地球上任何存在的物体一样亘古不变。然而实际上, 地球的巨大冰盖一直在不停地移动和演变, 而且近几十年来, 这种永不停歇的运动正在悄然加快。事实上, 极地地区的冰不仅在流动, 更令人担忧的是, 它正在消亡。

不断上升的大气和海洋温度正在加速冰川消融, 这导致了全球海平面上升, 其发展态势甚至比预期的还要快。现有的冰川动力学和冰排放模型低估了近几十年来冰川消融的实际速度, 这使得研究格陵兰岛 Nioghalvfjærdsbræ 溢出冰川的物理学家 Angelika Humbert 的工作变得尤为重要和紧迫。

Humbert 是德国 Alfred Wegener Institute (AWI) 亥姆霍兹极地和海洋

研究中心冰川团队的领导者, 她的工作是从 Nioghalvfjærdsbræ 冰川的持续消融中汲取更广泛的经验教训。她的研究将实地观测的数据与冰盖行为的黏弹性仿真相结合, 通过改进模拟冰川流动弹性效应的模型, Humbert 和她的团队希望能够更准确地预测冰川消融, 由此评估对全球海平面产生的影响。

她清楚地知道她的时间很紧迫。“Nioghalvfjærdsbræ 是格陵兰岛最后三个‘浮舌’冰川之一, 几乎所有其他的浮舌形态都已经解体了。” Humbert 解释说。

## » 可能会使全球海平面上升 1.1 米的冰川

北大西洋的格陵兰岛被仅次于南极

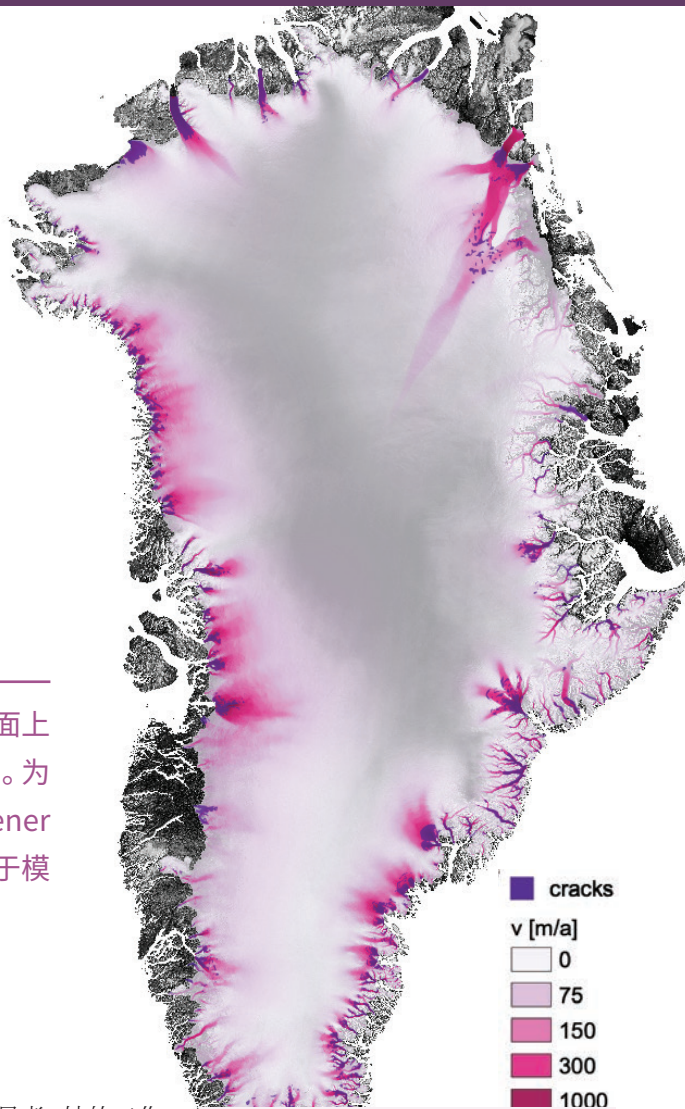


图 1 格陵兰岛的地图。红色的标尺表示某些地区的冰川的运动速度。请注意, 运动最大的区域往往是在海岸附近。紫色实心区表示冰盖上巨大裂缝的位置。  
图注: Cracks - 裂纹

洲的世界第二大冰盖所覆盖 (图 1)。格陵兰岛人烟稀少的地貌看起来似乎没有受到任何破坏, 但实际上气候变化正在撕裂它的冰幔。

Humbert 和她的同事于 2021 年发表的一篇文章指出, 不断向海洋排放冰块是“冰盖质量平衡的一个基本过程”。该文章认为, 整个格陵兰岛东北冰川所包含的冰如果融化, 足以使全球海平面上升 1.1 米。虽然整个冰层或许不会消失, 但自 1990 年以来, 格陵兰岛的整体冰盖已经大幅减少。这一衰减过程在整



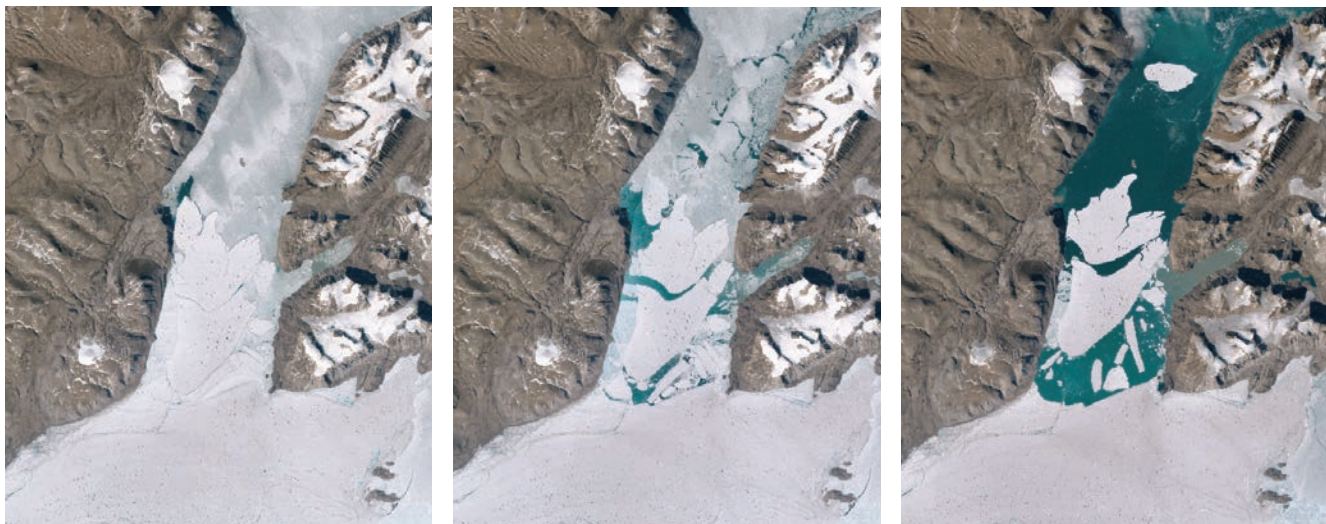


图2 从2020年6月到7月的这组图像中，可以看出 Nioghalvfjærdsbræ 冰川溢出口的一部分漂浮冰川断裂并脱离。

个岛上并不是线性的，也是不均匀的。虽然 Nioghalvfjærdsbræ 冰川现在是格陵兰岛最大的溢出冰川，但它附近的 Petermann 冰川曾经比它更大，只是后来一直在快速收缩。

### » 现有模型低估了冰川消融的速度

格陵兰岛的整体冰川消融与“裂冰”不同，后者是指冰山从冰川的浮动冰舌上断开。虽然裂冰并不能直接使海平面上升，但这一过程可以加快陆基冰向海岸移动。欧洲航天局的卫星图像（图2）曾捕捉到一个快速且剧烈的裂冰活动。在2020年6月29日至2020年7月24日这段时期，125平方公里的 Nioghalvfjærdsbræ 冰川的一个浮冰崩裂成了许多独立的冰山，它们随后漂移并消融在北大西洋中。

直接观察冰盖行为虽然很重要，但还不足以预测格陵兰岛的冰川消融轨迹。几十年来，冰川学家一直在建立和完善冰盖模型。然而，正如 Humbert 所说，“这种方法仍然有很多不确定性”。从2014年开始，AWI 团队联合了其他14个研究团队，对直到2100年的潜在冰量

减少预测进行了比较和完善，并将过去几年的预测与实际发生的冰量减少进行了比较。遗憾的是，“专家们的预测远远低于2015年以来实际观测到的冰量的减少。格陵兰岛的模型低估了目前气候变化导致的冰盖变化。”AWI 的 Martin Rückamp 介绍到。

### » 通过黏弹性模型捕获快速作用力

Humbert 曾经多次亲自前往格陵兰岛和南极洲收集数据和研究样本，但她也承认，直接研究冰川学的方法存在局限性。“实地观测非常昂贵和耗时，并且我们能看到的只有这么多。”她表示，“我们想要了解的东西隐藏在一个系统中，而这个系统的大部分都埋在大量的冰层下面。我们需要仿真来帮助揭示是什么行为导致了冰的流失，以及隐藏在这些行为背后的原因。”

自20世纪80年代以来，研究人员一直依靠数值模型来描述和预测冰盖的演变。“研究发现，可以通过建立黏性幂律函数模型来模拟温度变化对冰盖的影响。”Humbert 解释说，“如果你正在模拟的是一个稳定、长期的行为，并且获得

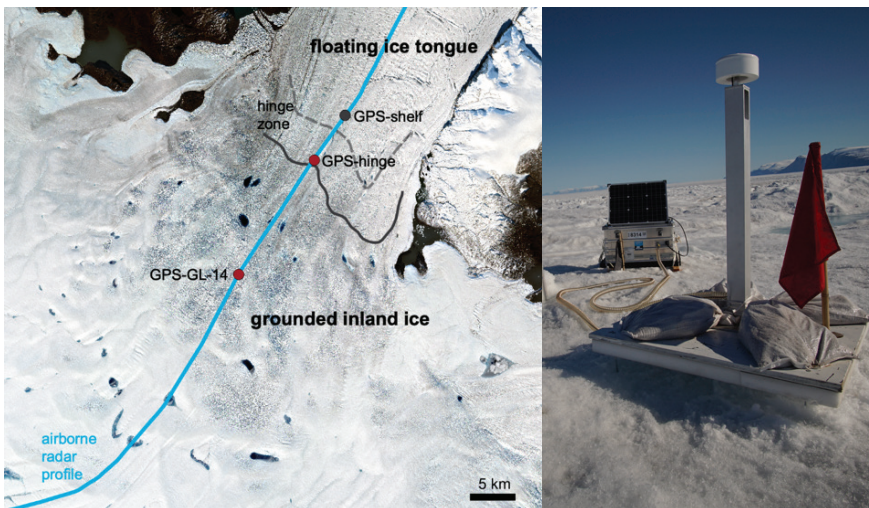
了正确的黏性变形和滑动，那么你的模型是可以胜任的。但是如果你想要模拟短时间内变化的载荷，就需要使用不同的方法。”

是什么导致了影响冰盖消融的载荷发生短期变化？Humbert 和 AWI 团队将注意力集中在了重要但尚未明确的力的两个来源：漂浮冰舌下的海洋潮汐运动（图2）和格陵兰岛本身崎岖不平的地形地貌。这两个因素都有助于确定冰盖向海洋移动的速度。

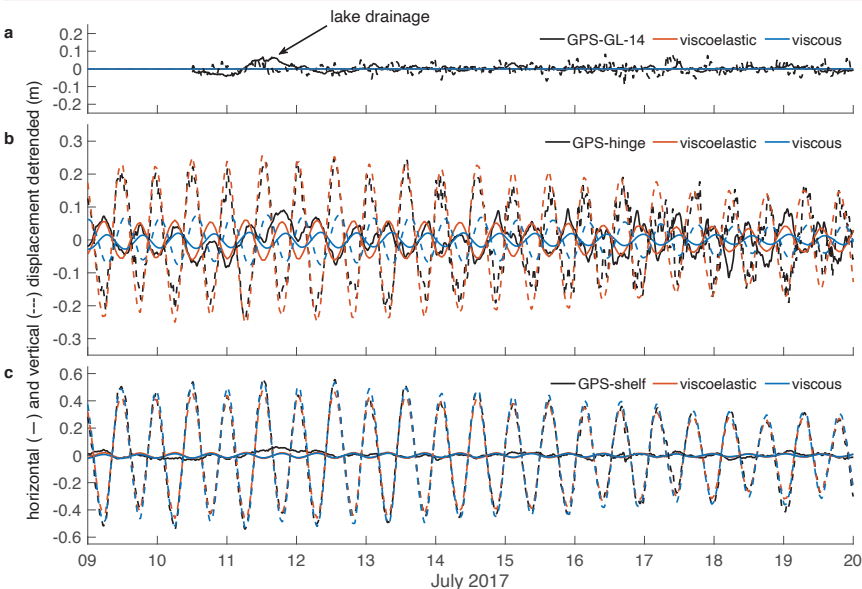
为了研究由这些因素引起的弹性变形，AWI 团队在 COMSOL® 软件中建立了 Nioghalvfjærdsbræ 冰川的黏弹性模型，其几何形状是基于雷达测量的数据建立的。团队使用该模型在由图3中蓝线的垂直截面组成的二维模拟域上求解了黏弹性麦克斯韦材料的基本方程，然后将模拟结果与四个GPS站点获得的冰川流动的现场测量结果进行了比较。

### » 潮汐如何影响冰川运动

格陵兰岛周围的潮汐通常会在一个周期内使海水线涨落1~4米。这一作



**图 3** 安置在 Nioghalvfjordsbræ 冰川 (左) 上的 GPS 测量站点和一个独立的测量站 (右)。右边的照片由 AWI 的 Ole Zeising 拍摄。  
 图注: Floating ice tongue – 浮动冰舌; hinge zone – 转折区; GPS-hinge – GPS 枢纽; GPS-shelf – GPS 陆架; grounded inland ice – 搁浅的内陆冰



**图 4** Nioghalvfjordsbræ 冰川上三个测量站点的冰川冰位移随时间的变化。黑线表示测量的位移, 橙线表示 AWI 在 COMSOL® 软件中建立的“COMice-ve”黏弹性模型模拟的位移, 蓝线表示使用黏性模型模拟的位移。  
 图注: lake drainage – 湖泊排水; viscoelastic – 黏弹性; viscous – 黏性; horizontal – 水平的; vertical – 垂直的; displacement detrended – 去趋势位移; GPS-GL-14 – 距接地线 14 公里的 GPS 站点; GPS-hinge – GPS 枢纽; GPS-shelf – GPS 陆架

用对溢出冰川的浮动冰舌施加了巨大的力, 这些力同时也被传递到了冰川的陆地部分。AWI 的黏弹性模型探讨了这些应力分布的周期性变化如何影响冰川向海洋的流动。

图 4 中的图表显示了在三个站点测量的潮汐作用在 Nioghalvfjordsbræ 冰川上的应力, 它们与黏性和黏弹性模拟预测的应力重叠。图 4a 显示了在距离接地线 14 公里的陆地区, 位移如何进一

步下降。图 4b 显示了周期性潮汐应力在 GPS 枢纽处减少, 该处位于陆地和海洋之间接地线附近的弯曲区。图 4c 显示了安装在海洋浮冰上 GPS 陆架处的活动。据此可知, 图 4 显示了作用在冰面上的最明显的周期性潮汐应力波形。

“漂浮的冰舌上下移动, 在冰川的陆地部分产生了弹性反应。” AWI 团队的数学家 Julia Christmann 说道, 她对团队构建仿真模型起到了关键作用。“在内陆冰层和地面之间还有一个冰川下的液态水水文系统。尽管我们可以看到它影响冰川的证据, 但我们对这个地下水系统知之甚少。”例如, 图 4a 显示了位于冰川顶部的一个湖泊下面的压力峰值。“湖水穿过冰层向下流动, 增加了冰川下水层的厚度, 并且增强了它的润滑效应。” Christmann 解释说。

与纯黏性模型相比, 绘制的趋势线表明该团队构建的黏弹性模型的模拟结果更加准确。正如 Christmann 所解释的, “黏性模型没有模拟到应力变化的全部范围, 也没有显示正确的振幅。如图 4 中的图表 c 所示, 在弯曲区, 我们可以看到由于弹性反应, 这些力有一个相位转移。” Christmann 继续解释道: “只有考虑到黏弹性‘弹簧’的作用, 才能得到一个准确的模型。”

### » 模拟不均匀地形地貌引起的弹性应变

格陵兰岛冰川上的裂缝不仅揭示了其底层地形地貌的不均匀性 (图 5), 还进一步验证了冰川不是一种纯黏性材料。Humbert 介绍说: “你可以随着时间的推移观察冰川, 会看到它像黏性材料一样蠕动。”然而, 纯黏性材料不会像冰盖那样形成持久的裂缝。她接着说道: “从冰川学研究开始, 我们就不得不



图 5 Nioghalvfjærdsbræ 冰川的鸟瞰图显示了大量的裂缝图案。图片由 AWI 的 Julia Christmann 拍摄。

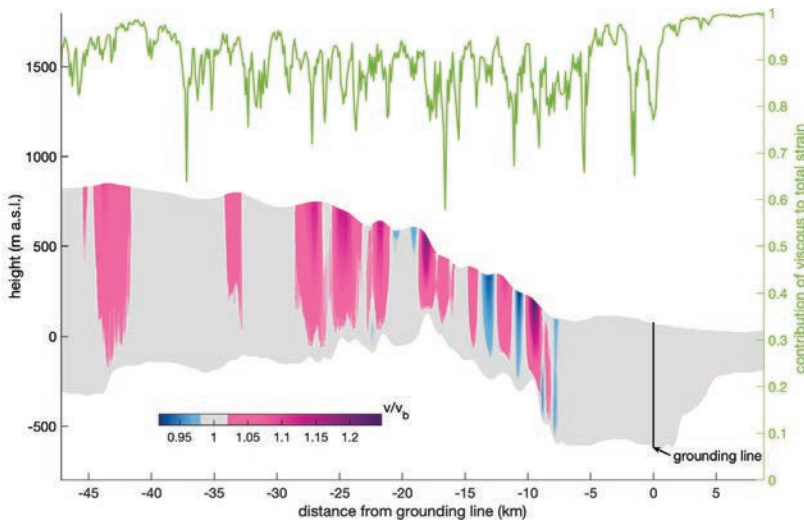


图 6 Nioghalvfjærdsbræ 冰川的横断面 (左标尺) 显示了冰川内部的垂直运动速度与冰川底部的运动速度的对比。蓝色区域的移动速度比基底区域速度慢, 而粉色和紫色区域的移动速度比基底区域的冰块移动快。绿线 (右标尺) 显示了沿横断面线的黏性应变与总应变的比例。  
图注: distance from grounding line – 距陆地线的距离; height – 高度; contribution of viscous to total strain – 黏性总应变的贡献

接受这些真实存在的裂缝。”该团队的黏弹性模型提供了一种新的方法来探索 Nioghalvfjærdsbræ 冰川下的地形地貌是如何促进裂缝的出现和影响冰川滑动的。

“当我们做模拟时, 对地形所产生的弹性应变总量感到惊讶。” Christmann 解释说, “我们在遥远的内陆也看到了这些影响, 在那里它们本应与潮汐变化无关。”

图 6 显示了冰川的垂直变形与冰川底层地形的对应关系, 这可以帮助研究人员了解局部弹性垂直运动如何影响整

个冰川的水平运动。阴影区域表示该区域冰川的速度与它的基底速度的比较。蓝色区域的冰川的垂直运动速度比基底区域更慢一些, 表明冰层正在被压缩。粉色和紫色区域的冰川的垂直运动速度比基底区域移动更快, 表明冰川正在被垂直拉伸。

这些模拟结果表明, AWI 团队的改进模型可以更准确的预测冰川运动。“这对我们来说是一个令人惊叹的结果。” Humbert 说, “与潮汐的涨落产生的弹性应变影响冰川流动一样, 现在他们也可以模拟基岩上的弹性应变。”

## » 仿真规模将不断扩大

Nioghalvfjærdsbræ 冰川的改进黏弹性模型只是 Humbert 几十年来将数值仿真用于冰川学研究的一个最新例子。她表示: “COMSOL® 软件非常适合我们的工作, 它是一个可以验证我们新想法的神奇工具, 而且不需要我们编写代码, 这使调整设置和进行新的仿真实验变得更加容易。” Humbert 的学生经常将仿真用于他们的研究中。例如 Julia Christmann 的关于冰架结冰的博士工作, 以及她的另一个学位项目, 该项目模拟了将消融水从地表带到冰底的冰川下通道的演变。

AWI 团队为他们的调查研究工作感到自豪, 但也充分认识到全球的冰盖还有很多仍然是未知的, 而时间又非常的紧迫。“我们无法对整个格陵兰岛进行麦克斯韦材料仿真,” Humbert 承认, “我们可以花费数年的时间计算, 但仍然不能覆盖所有冰盖。但是, 也许我们可以对模型的局部弹性响应效应进行参数化, 然后在更大的范围内实施它。”

研究对象的规模决定了 21 世纪的冰川学家所面临的挑战, 他们的研究对象的规模是惊人的, 但他们的工作对全球的意义也是惊人的。即使他们的知识在不断增长, 也必须更快地找到更多信息。Angelika Humbert 欢迎其他领域中也正在研究黏弹性材料的人对她的工作提出建议。她说: “如果其他 COMSOL 用户正在处理麦克斯韦材料的断裂问题, 他们可能会面临一些与我们相同的困难, 即使他们的模型与冰无关, 也许我们可以进行交流, 共同解决这些问题。”

秉承着这种精神, 也许我们这些从冰川学家的工作中受益的人可以帮助他们承担一些巨大和沉重的挑战。◎

# 使用声学仿真进行虚拟产品开发

作者 ROGER SHIVELY

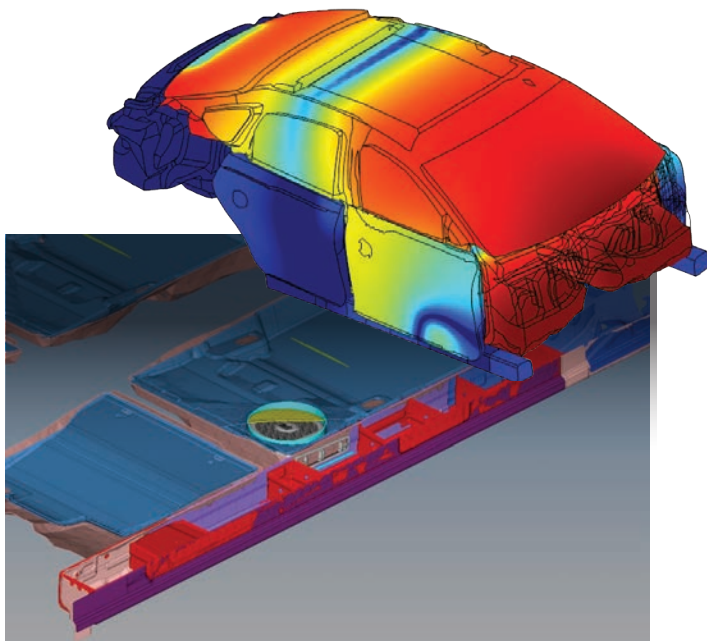
全球的原始设备制造商,特别是在汽车行业,正在通过使用仿真软件减少对物理原型的需求,帮助企业控制成本。

在汽车领域,仿真最早被用于车辆碰撞安全、耐久性以及噪声、振动和粗糙度(NVH)等领域的研究中。这些仿真为建立高效的音频系统和车辆声学模型奠定了基础。例如,为碰撞、耐久性和噪声模型创建的网格正在被重新用于声学仿真。无论这是由原始设备制造商或是零部件制造商完成,还是由像 JJR Acoustics 这样的独立咨询公司完成,重新利用这些网格节省了由原始 CAD 文件创建它们所需的大量资源。

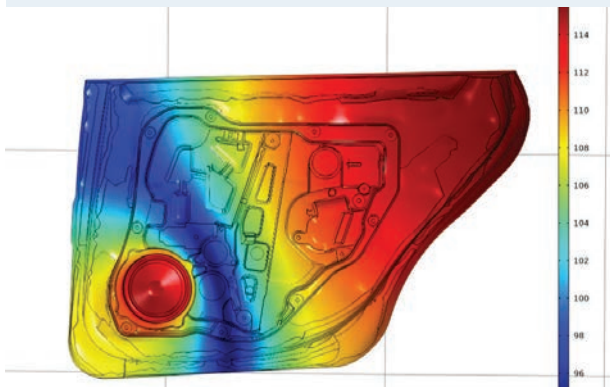
COMSOL Multiphysics® 软件强大的声学仿真功能,可以帮助汽车音响工程师在保持扬声器设计完整性的同时,将音响系统的扬声器集成到汽车中。现在,大部分模拟、调谐和可听化都是在实验室外完成的。无论是通过虚拟的方式还是在实验室内进行测试,探索不同的调谐方案有助于声学工程师对声学空间和扬声器系统的理解,从而找出最佳的车内音频体验。然后,这些知识可以用于改变汽车装饰、扬声器和扬声器的位置。多物理场仿真软件的出现,使这些优化和迭代过程都可以虚拟地进行。通过开发或使用现有的数字孪生模型,工程人员在概念车仍处于设计阶段时就能对其进行虚拟的声学调谐。对于使用传统物理原型的工程师而言,当他们熟悉了这样的数字化工作流程后,就可以在室内进行设计之前对整体进行快速、高效的探索。

使用 COMSOL® 软件实现的系统级汽车仿真可以用于优化扬声器的位置,以及减弱扬声器的位置对结构的影响。这类仿真需要在很大频率范围内对整个车厢进行模拟。乘客头部的平均声音频率响应是决定音频质量的一个关键指标,这可以通过测量车内的多个聆听位置获取。

展望未来,音乐播放中的主动降噪的功能设计将是声学工程师关注的重点。对噪声的传递路径以及噪声消除进行多物理场仿真,对于理解这些现象的影响并将其应用到设计过程中而言至关重要。🔗



一个优化低音扬声器安装位置、声压级模式和聆听者处的声压级响应的示例。



低音扬声器与车门结构的相互作用。



## 关于作者

Roger Shively 是位于美国西雅图的 JJR Acoustics 公司的联合创始人。他在工程研究和产品开发方面拥有超过 34 年的经验,并在产品生产和为全球原始设备制造商推出新产品方面具有宝贵的经验。在 2011 年创立 JJR Acoustics 之前, Roger 自 1986 年一直在哈曼国际汽车部门担任声学系统总工程师,以及在北美和亚洲工程产品开发团队担任职能经理。