

# COMSOL NEWS

多物理场仿真杂志



## 仿真赋能 氢燃料汽车

丰田使用多物理场仿真  
驱动生成式设计  
加速燃料电池开发

P 10



仿真帮助农民和贸易商  
预测农产品的保质期

P 6

## 通过仿真俯瞰全景

无论是壮丽的山水风景还是美洲虎的脸部特写，一幅拼图需要每一片都能无缝地拼接，才能展现出完整的画面。同样，产品设计或生产过程中的每一个组件也必须既能独立运行，又能协同工作。全球的工程师、科学家和研究人员正在使用多物理场仿真探究和优化组成完整系统的各个部分。在本期 COMSOL News 中，我们汇编了他们的创新应用案例，以期为您带来启发和灵感。

北美丰田研究院的研发团队使用仿真方法优化流场微通道板的设计，推动了氢燃料电池的发展。Zeugin Bauberatungen 公司通过仿真分析吸音窗帘和隔音板的性能，减少了开放式办公空间中的噪声干扰。

此外，工程人员还通过开发和部署仿真 App 来实现特定场景的仿真分析和大规模应用。瑞士的研究机构使用由仿真 App 驱动的移动应用程序来预测新鲜农产品的保质期，以改善发展中国家冷藏食品的存储和使用。海德堡材料公司通过仿真 App 帮助建筑团队在项目中做出明智决策，在保证预算的同时，提供最好的结果。

本期 COMSOL News 中，我们还分享了一些关于可视化、三维电机仿真和 MEMS 器件等主题的文章，旨在为您提供相关的仿真技巧和灵感。无论在哪个应用领域，对局部进行优化的同时还需要把控全局，这样才能够最终获得出色的设计方案。

Rachel Keatley  
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)

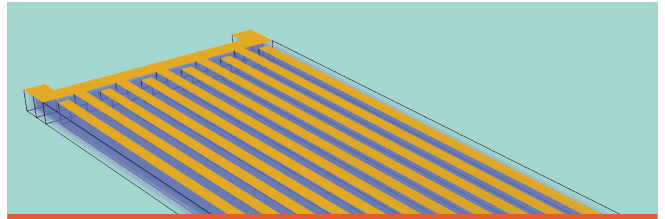
© 2023 COMSOL。COMSOL、COMSOL Multiphysics、COMSOL Server 和 COMSOL Compiler 是 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品与这些商标所有者无关，也未得到这些商标所有者的认可、赞助或支持。有关此类商标所有者的列表，请参阅 [www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks)。

# 目录



## 仿真实践

- 4** 模型可视化技巧  
COMSOL, 美国



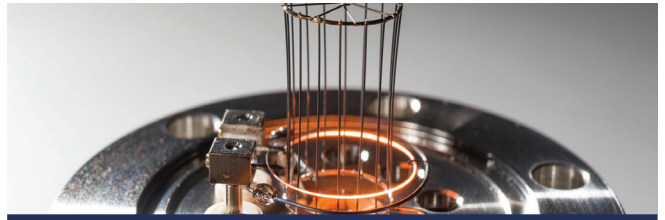
## 技术创新

- 14** 通信系统的基石: 射频 MEMS 谐振器  
COMSOL, 美国



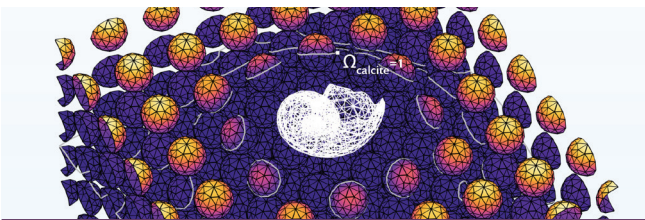
## 仿真 App 应用

- 6** 借助仿真 App 预测水果保质期  
Empa, 瑞士
- 16** 多物理场仿真进驻施工现场  
海德堡材料, 挪威 & 瑞典



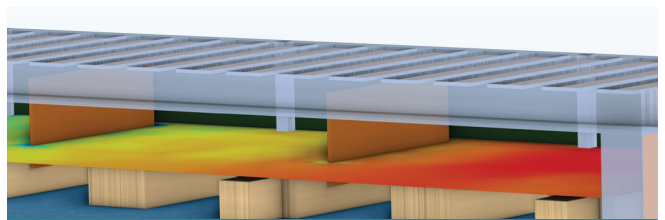
## 产品开发

- 20** 借助仿真优化电离真空计性能  
INFICON, 列支敦士登
- 33** 使用三维模拟: 电机仿真加速汽车电气化  
COMSOL, 瑞典



## 科研聚焦

- 10** 生成式设计推动氢燃料电池高速发展  
丰田北美研究院, 美国
- 26** 腐烂的贝壳如何帮助海洋维持碱度  
乌特勒支大学, 荷兰



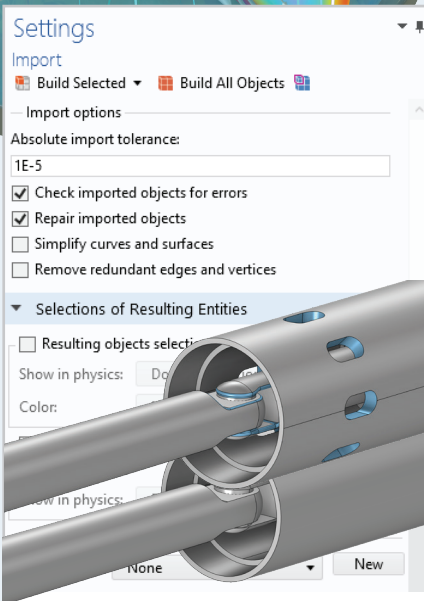
## 设计优化

- 23** 小型卫星的传热仿真  
COMSOL, 美国
- 30** 协调开放式办公室的声学环境与设计风格  
Zeugin Bauberatungen, 瑞士

# 模型可视化技巧

作者 DIXITA PATEL

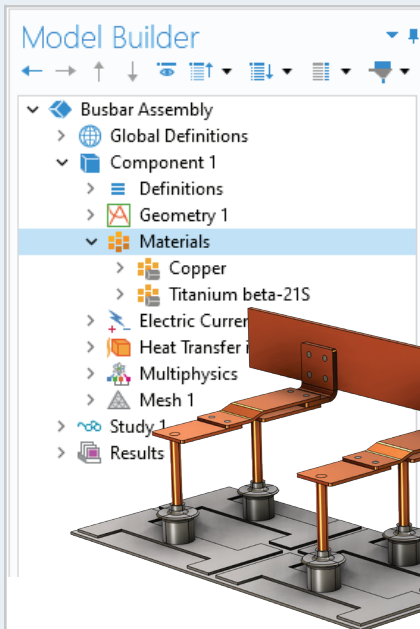
仿真模型是真实世界的一种虚拟表征,这可以通过确保模型的尺寸、整体几何形状和物理场的准确性来达到。不仅如此,通过仔细考虑和选择颜色、纹理和光照,还能够使模型看起来更加逼真。本文介绍的技术不仅可以帮您生成有用的结果,还能增强模型在视觉上的吸引力。



## 几何结构

从仿真初始就需要创建正确的几何形状和尺寸。您可以选择从头开始构建模型的几何结构,或者使用接口产品导入三维 CAD 文件。

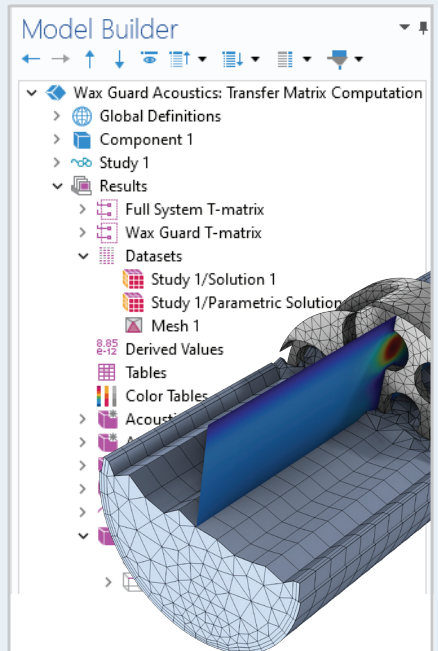
通过为域和边界分配不同的颜色,使模型更容易解读。使用工具修复有缺陷的几何图形、去除过于精细的几何特征,适当简化几何实体,以使模型适合仿真分析。



## 材料

根据模型的真实情况匹配颜色和纹理。为几何结构指定材料时,可以使用材料的实际颜色渲染模型组件,通过 **显示材料颜色和纹理** 选项,可以将指定材料的真实渲染可视化。

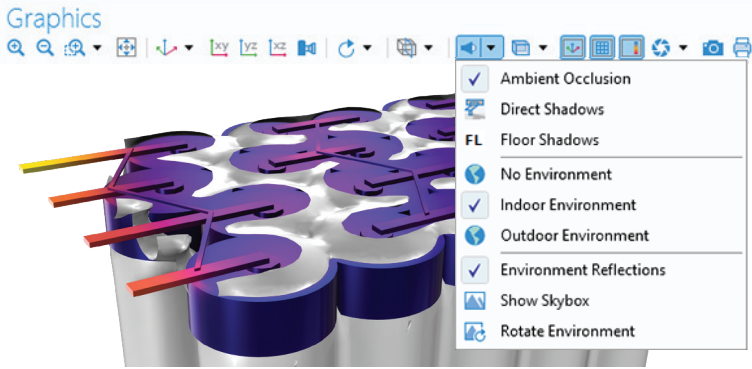
为了创建逼真的可视化效果,还可以使用 **材料外观** 功能混合显示仿真结果图和部分几何结构。



## 网格

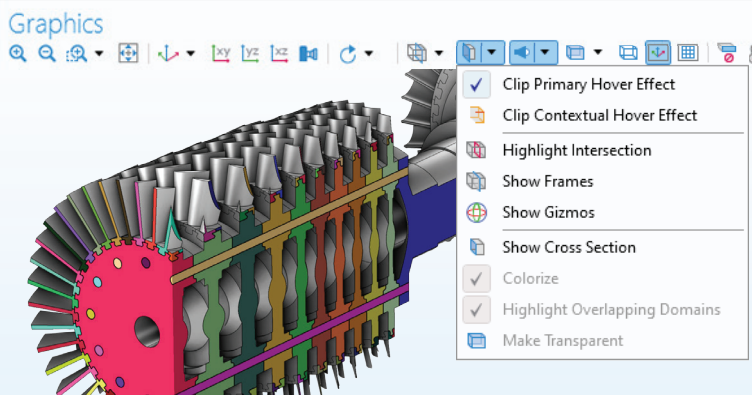
自动或手动创建合适的网格。**结果** 节点下的所有绘图分别指向一个包含解的数据集,用于结果可视化和结果分析。您可以直接使用基于 **网格** 数据集类型的 **网格** 绘图可视化与网格相关的量,而无需计算解。

这对于展示二维或三维网格质量、网格大小,或者显示不同网格单元类型(如三角形、四面体和金字塔形)非常有用。



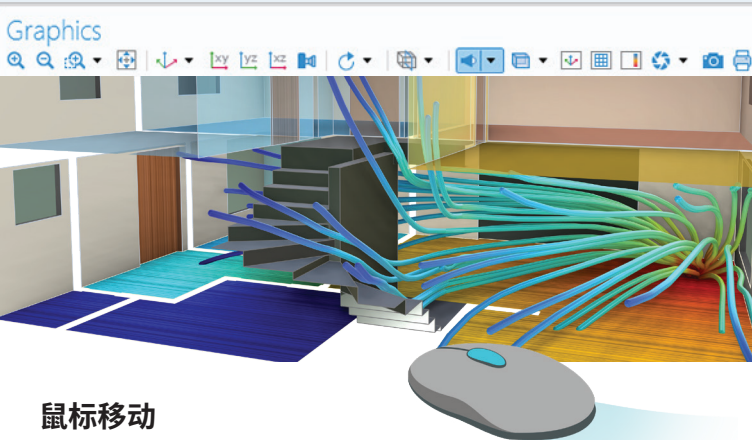
## 场景光照

增强模型真实感。可以通过 **环境光遮蔽**、**直接阴影** 和 **地板阴影** 功能增加逼真的照明效果，还可以通过物体间阴影改善深度感知。**室内环境** 和 **室外环境** 选项可以增加反射效果。



## 剪裁平面

查看复杂几何结构的内部。您可以使用交互式剪裁功能选择复杂三维几何结构中的边、边界和域，通过添加剪裁平面、框、圆柱和球体，观察相应的部分结构。



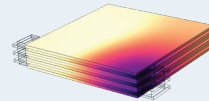
## 鼠标移动

改变视角。使用快捷方式可以穿过场景中的物体移动摄像机，为几何图形创建醒目的视觉效果。

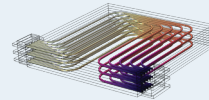
## 随堂练习

准备好动手实践这些小技巧了吗？即刻打开 COMSOL Multiphysics®，查找案例模型，开始您的仿真！结合使用软件中的多种功能，您可以通过使用这些令人惊叹的视觉效果来增强仿真结果。

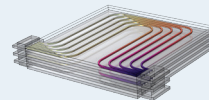
Application ID: 10368



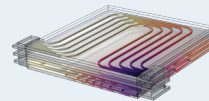
默认温度绘图。



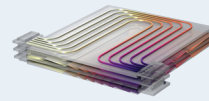
选择流道边界条件，添加材料外观。



选择电池模组边界条件，添加材料外观和透明度。



添加等温线表示温度。



取消选择 **绘制数据集的边** 并打开 **环境遮挡光照**。

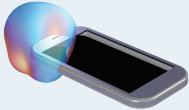
Application ID: 18837



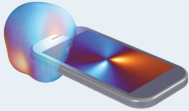
描绘远场增益的默认 **辐射方向图**。



增加透明度和白色的细栅格线。



选择手机外部边界条件，添加材料外观和颜色。



选择屏幕边界条件，添加一个表面绘图表示远场增益。



打开 **室内环境光照**。

Empa, 瑞士

# 借助仿真 App 预测水果保质期

瑞士研究机构 Empa 借助数值仿真开发模型并编译了一个仿真 App, 可以将仿真结果直接反馈到农民和贸易商使用的智能手机应用程序中, 来预测新鲜水果和蔬菜的保质期。这项工作由一个致力于改善发展中国家冷藏食品储存现状的国际联盟组织支持。

作者 RACHEL KEATLEY

新鲜农产品在收获后的运输过程是全球食品供应链中一个非常明显的薄弱环节。每年, 全球供人类消费的食品中约有三分之一被损失或浪费。冷藏配送和存储问题是造成这些损失的主要原因, 尤其是在像印度这样的发展中国家, 仅有 6% 的粮食产品进入冷藏“冷链”, 导致大部分食品很容易腐烂变质。目前, 如小型太阳能冷藏室(图 1)之类的稀缺冷藏空间, 可能会被已经过了盛产期的农作物占用, 而其他货物则在等待进入冷藏室的过程中腐烂变质。

作为食品供应链利益相关者的国际联盟的一部分, 瑞士联邦材料科学与技术实验室 (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Empa) 和巴塞尔可持续能源机构 (Basel Agency for Sustainable Energy, BASE) 开发了一款名为 Coldtivate 的移动端应用程序来帮助缓解这些问题。通过该应用程序, 用户可以实时获知不同种类水果的冷却和腐烂过程。Coldtivate 由多物理场仿真技术驱动, 于 2022 年底在印度的 3 个地

区推出, 并于 2023 年推广给尼日利亚的冷库经营者使用。在手机上使用该应用程序的果农不会看到底层的多物理场模型, 也不会直接与仿真 App 进行交互。他们需要做的仅仅是在手机上简单操作 Coldtivate 应用程序即可获得结果。

## » 基于仿真预测优化食品储存

基于 Empa 使用 COMSOL Multiphysics® 软件及其内置的 App 开发者创建的仿真 App (图 2), 所获得的数据可以使 Coldtivate 移动应用程序预测冷藏室中农产品的新鲜度。

仿真 App 基于已有的 COMSOL Multiphysics 仿真模型创建, 具有简洁易用的界面, App 设计者可以决定在用户界面上显示哪些信息。虽然仿真 App 也可以直接使用, 但 Empa 和 BASE 仍然希望为终端用户 (主要是农民) 以他们最熟悉的方式显示仿真 App 的数据。由于移动应用程序被广泛用于现代农业实践中, 因此他们开发了 Coldtivate 应用程序供终端用户使用。

Empa 的数据科学家兼 Coldtivate



图 1 用于储存收获农作物的冷藏室。

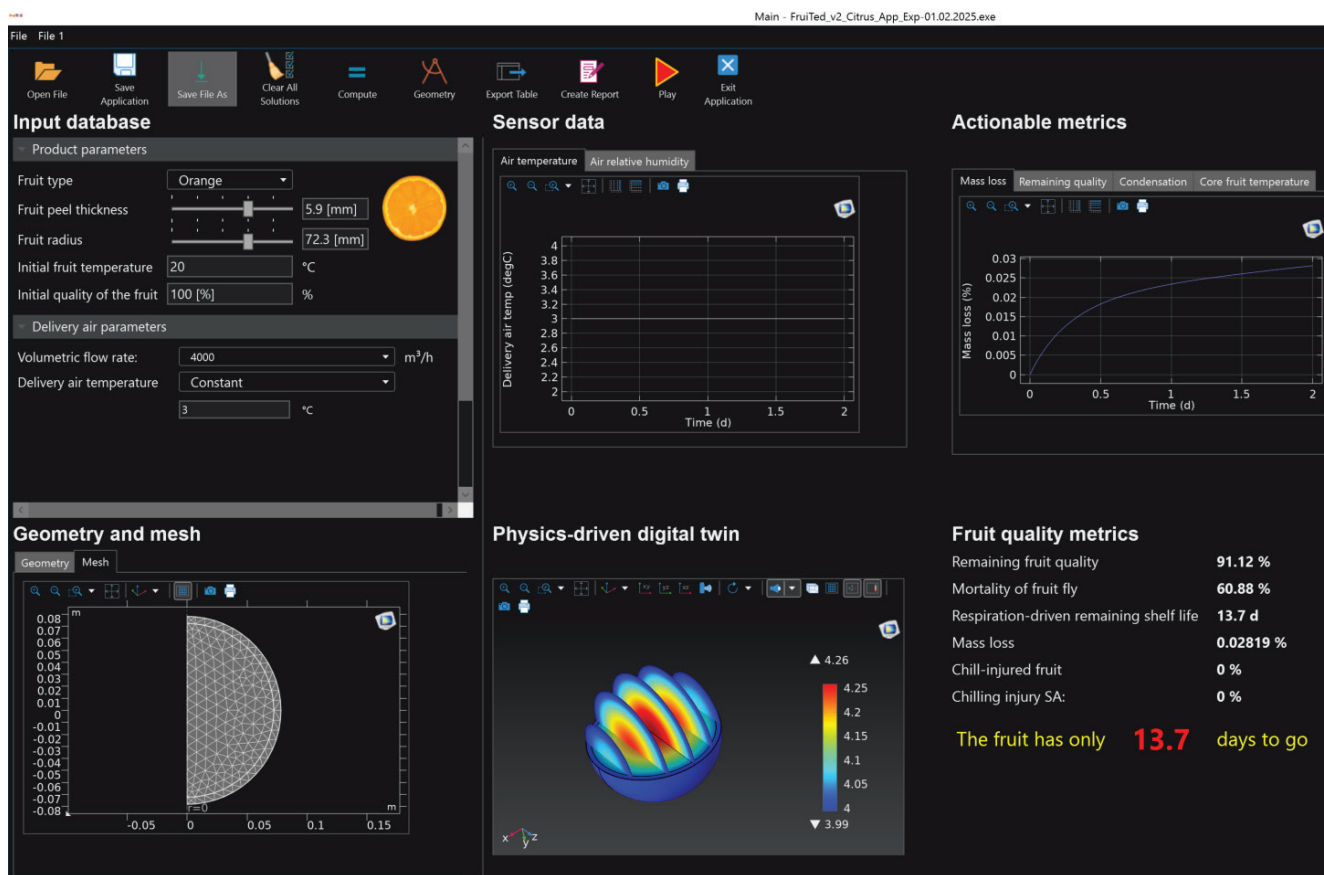


图 2 在台式电脑上运行的由 Empa 开发的 COMSOL 仿真 App，可以生成许多与农产品新鲜度相关的指标。

项目的技术负责人 Joaquin Gajardo 解释说：“我们开发的 COMSOL 仿真 App 与移动应用程序在同一台无外服务器上运行，因此它们之间可以相互传递信息。我们使用 App 开发器开发的仿真 App 能够基于移动应用程序中输入的参数，自动更新模拟结果。”这样，Empa 就将多物理场模型的功能与移动应用程序的便利性结合在了一起。为了能以这种方式使用仿真 App，他们首先使用 COMSOL Compiler™ 将 App 编译成了独立的可执行文件。

“如果没有 App 开发器，我们就不可能将数字孪生推广到移动应用程序中，也无法通过普及多物理场仿真及其结果使更多像个体农民这样的人群受益。” Empa 资深科学家、瓦赫宁根大学

与研究中心的 Thijs Defraeye 教授补充道。

### » 仿真 App 背后的模型

环境温度会直接影响新鲜农产品的保质期。虽然大多数冷藏室内都有温度计，但它们提供的数据还不足以预测水果和蔬菜的保质期。

Defraeye 介绍说：“我们无法通过冷藏室的单一温度曲线或湿度曲线来确定农产品的保质期。每个储藏箱的 COMSOL 模型都可以接收冷藏室的实际温度和湿度数据，从而可以频繁地重新计算剩余保质期。” Empa 的仿真 App 正是基于这一模型建立的。

此外，冷藏室内的传感器并不能准确反映储藏箱内部的苹果温度，尤其

是在储藏箱最近才被搬进冷藏室的情况下。

为了更全面地了解每批农产品如何受到不同储存条件的影响，Empa 目前正在使用 COMSOL Multiphysics 软件对模型进行扩展（图 3），以模拟各种水果和蔬菜的整批运输。“为此，我们需要使用基于多孔介质的模拟方法，从传感器读数中生成可操作的指标。” Defraeye 提出。

### » 运行中的应用程序

“比方说，一批新货物抵达冷库，” Gajardo 对 App 的用法进行介绍，“当操作员打开手机上的 Coldtivate 应用程序，输入产品类型、当前温度、收获天数和其他相关数值后，Coldtivate 会立

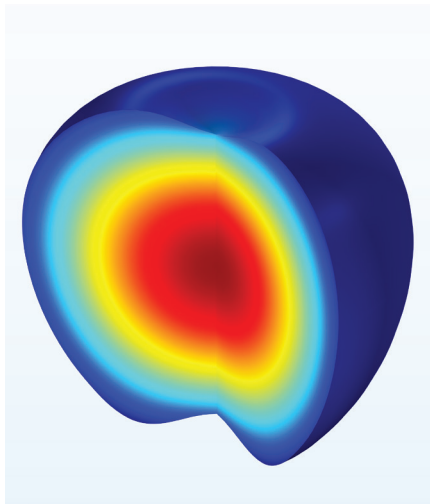
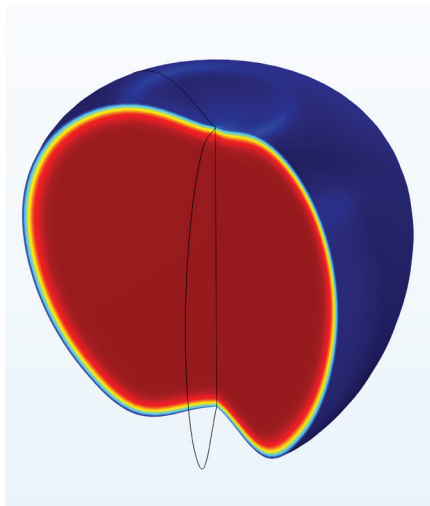


图 3 Empa 使用 COMSOL 创建的苹果模型，模拟结果显示了苹果内部的温度分布如何随时间受到表面温度的影响。

即生成一个包含这些信息的文本文件。这些数值将作为 COMSOL 仿真 App 的输入参数，用于计算预期保质期。最后，计算结果被写入输出文件，剩余质量和预期保质期天数随后便显示在 Coldtivate 的用户界面上。”

每隔 6 小时，Coldtivate 应用程序就会根据最新的冷藏室温度数据重新进行计算，并更新用户界面上显示的预测数值（图 4）。农民可以直接在手机应用程序上查看储藏箱内货物的剩余保质期，如果他们没有智能手机，“仓库经营

者可以通知他们的农产品在冷库中还能保鲜多久。”Gajardo 总结道。最终，这些信息将帮助农民避免廉价抛售货物以及对滞销农产品的不必要清理。

### 团队合作带来可靠的数据

Defraeye 和他在 Empa 的团队花了数年时间来建立他们的数据收集和仿真流程。他介绍说：“2021 年初，我们就已经在开发用于分析农产品新鲜度的模型了，但尚未在实际供应链中推广。”来自非营利性全球发展组织的问询促进了 Coldtivate 移动应用程序的诞生（图 5）。

“BASE 公司联系了我们，他们开发了创新的商业模式，以帮助农民更好地利用现有资源。”Defraeye 继续说，“我们的想法是，将单次付费使用的商业模式与智能技术相结合，来改善冷却系统的使用。要做到这一点，就要将那些有需求的人群与其他合作伙伴紧密联系在一起。”这些合作伙伴包括印度比哈尔邦、喜马偕尔邦和奥迪萨邦的制冷公司和其他利益相关者，他们与 BASE 和 Empa 共同发起了一项名为“您的虚拟冷链助理”的倡议。

“信任是关键因素。”Defraeye 指出，“通过仿真，我们可以获知农产品在一段时间内的变化情况，而智能手机应用程序则可以将这些信息提供给冷藏室经理或农场主等能够使用这些信息的人。我们的目标是增加销售环节的透明度，因为这将带来巨大的变化。如果农户和冷藏室经营者能够相信预测结果，这也将有助于他们相互信任。”

### Coldtivate 的实际应用

2022 年 8 月，Empa 及其合作伙伴将 Coldtivate 应用程序向选定的制冷公司发布，并对冷藏室经理进行了培训，教他们如何使用这个应用程序来跟踪他

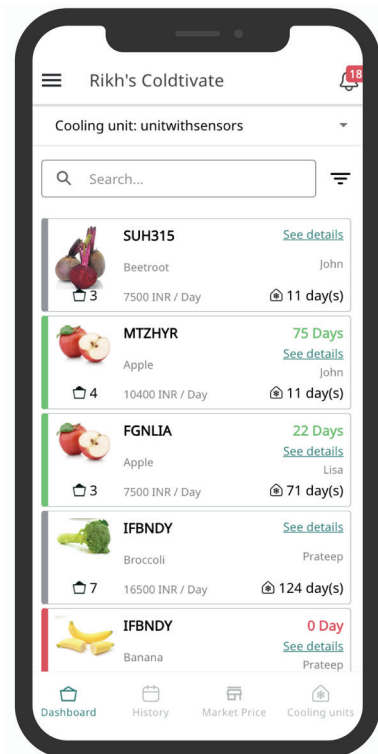
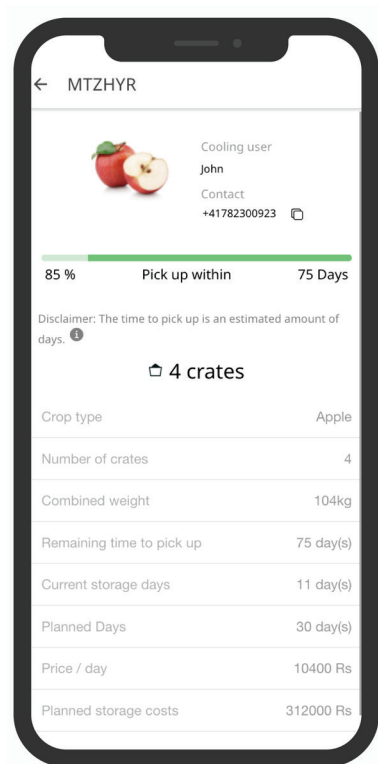


图 4 Coldtivate 应用程序用户界面显示的一个农民的储藏箱中物品的相关信息，包括剩余质量和预期保质期。



们储藏室中的农产品(图 6)。迄今为止,这款由仿真驱动的应用程序已在 17 个冷藏室进行试点,为 300 多名农民提供服务。据报道,这些农民的收入增加了 20%,同时收获后的粮食损失减少了 20%。Empa 及其合作伙伴目前正在努力扩大 Coldtivate 的影响。

Coldtivate 应用程序后续的更新将会提供如市场价格预测等更多相关信息,甚至可以根据农产品的照片预测作物质量。现在, BASE 和 Empa 正在与尼日利亚和菲律宾的组织合作, 希望将 Coldtivate 的价值带到全球更多的地方。

全球作物在收获后的损失规模令人生畏,但支持 Coldtivate 项目的国际联盟已经证明,取得进展指日可待。Defraeye 表示:“我们已经看到了基于仿真的预测工具如何改善冷却系统的使用情况。现在我们需要的是不仅仅是循序渐进的小步快跑,更需要大胆的行动来扩大我们的影响。我们要做的就是将技术交到更多的人手中,让他们利用技术来改变现状。”

### 致谢

Coldtivate 的开发由 data.org 包容性增长和恢复挑战基金(Inclusive Growth and Recovery Challenge grant)“您的虚拟冷链助理”提供部分资助,并受到洛克菲勒基金会(The Rockefeller Foundation)和 Mastercard 包容性增长中心(Mastercard Center for Inclusive Growth)的支持,还获得了德国联邦经济合作与发展部(BMZ)委托的“扩大您的虚拟冷链助理”项目的资助,目前由 BASE 和 Empa 代表德国国际合作署(GIZ)实施。此外,该项目团队对主要项目合作伙伴 Koel Fresh Private Ltd.、Oorja Development Solutions India Private Ltd. 和 ColdHubs Ltd. 在测试和调试保质期模型方面做出的贡献表示感谢。

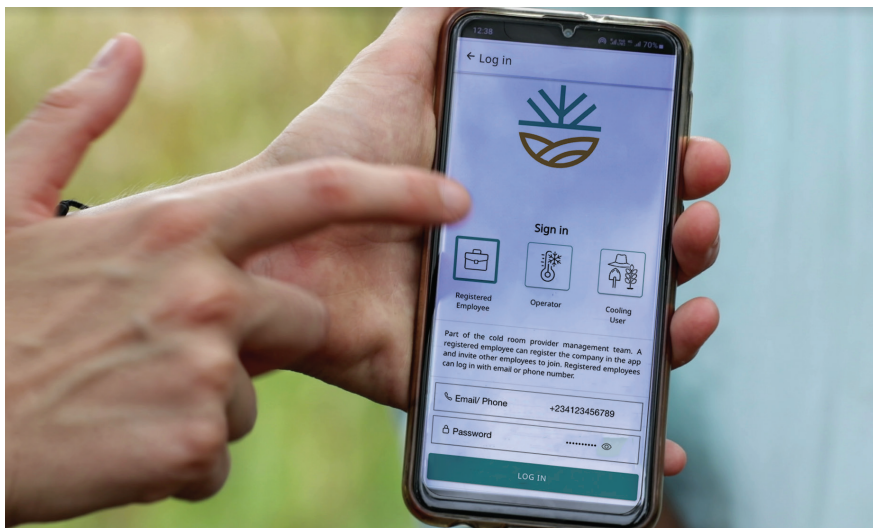


图 5 用户手中的 Coldtivate 智能手机应用程序。



图 6 印度奥迪萨邦的农民和冷藏室经营者正在参加 Coldtivate 应用程序的培训。

**“如果没有 App 开发器, 我们就不可能将数字孪生推广到移动应用程序中, 也无法通过普及多物理场仿真及其结果使更多像个体农民这样的人群受益。”**

—— THIJS DEFRAEYE, 资深科学家, EMPA

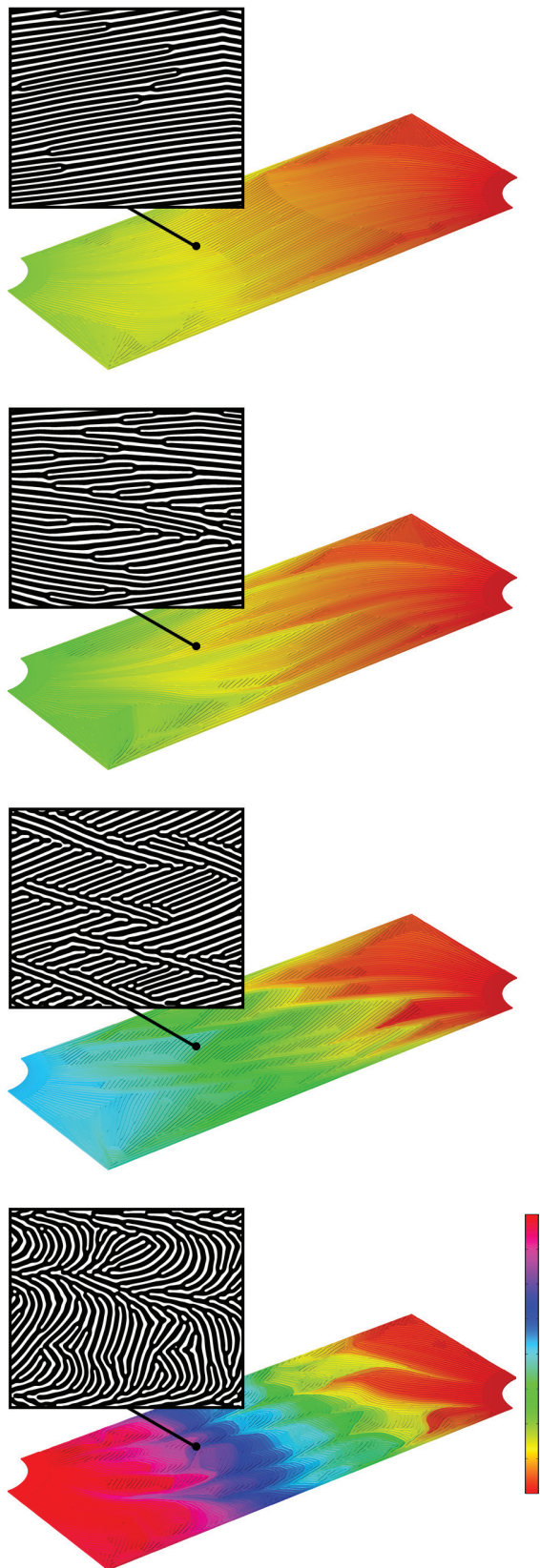


图 1 TRINA 团队使用 COMSOL Multiphysics® 软件创建的模型的仿真结果，显示了 4 个不同的微通道流场设计所产生的压力分布。

丰田北美研究院，美国

# 生成式设计 推动氢燃料电池 高速发展

丰田正致力于开发氢-氧燃料电池，作为纯电动汽车动力系统的一种替代方案。丰田北美研究院开发出一种基于仿真的设计方法，加速了燃料电池流场板的研发进程。

作者 ALAN PETRILLO

“电气化一切。”这句话已经成为那些寻求减少全球对化石燃料依赖的人们的一个口号。当马路上的混合动力汽车和纯电动汽车越来越多时，我们也能够感觉到电气化的势在必行。许多汽车制造商都在加大混合动力汽车和纯电动汽车的生产，然而有一家公司却致力于开发较少依赖传统电池的电动汽车。与传统的电化学电池储能不同，这些汽车使用的是氢气与空气中的氧气在燃料电池内结合所产生的电能。追求这一替代方案的正是丰田公司，尽管氢燃料汽车的商业化面临着诸多挑战，但如果能为世界提供高效的燃料电池汽车，就有可能成为全球最大的汽车制造商。

## » 仿真驱动生成式设计

丰田北美研究院 (Toyota Research Institute of North America, TRINA) 开发了一种由仿真驱动的生成式设计方法，并将其应用于引导氢-氧燃料电池等微反应器中反应物微通道板的设计。TRINA 团队在 *Chemical Engineering Journal* 上发表了一篇关于仿真驱动“逆向设计”过程的文章，他们将此过程应用于设计流场板，生成了 4 个独特的微通道设计 (图 1)。

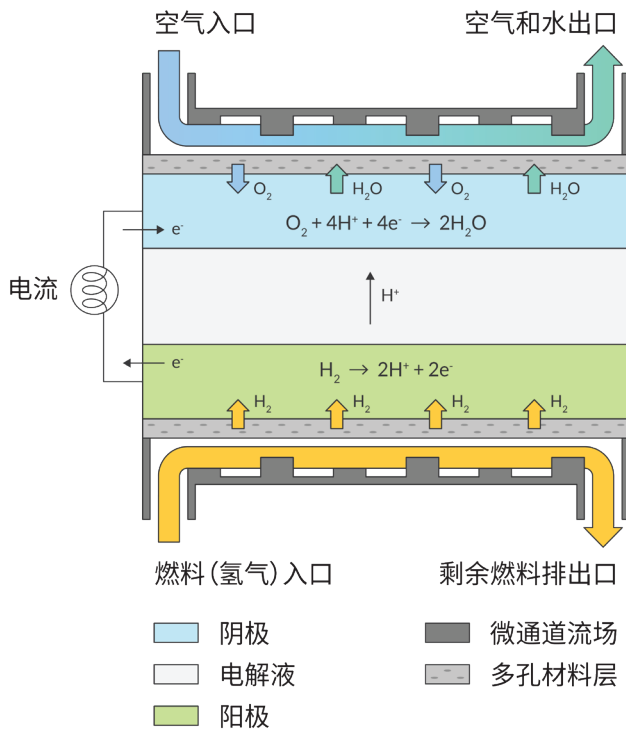


图2 一个通用的燃料电池设计。

这4个设计各有所长，在关键指标方面都优于现有的基准设计，而且更重要的是，它们体现了这种过程设计的价值。TRINA 已经展示了通过仿真驱动的生成式设计如何加速创新。“我们认为逆向方法可以彻底改变目前的设计方式。”TRINA 的研究员 Yuqing Zhou 表示。

### » 更清洁的动力系统选项

氢-氧燃料电池看似是为汽车提供电能的一种奇特方式，但这种技术本身并不新鲜，其机理也很简单。图2展示了一个通用的燃料电池的基本原理。当氢气流经阳极时遇到催化剂并被分离成氢离子和电子。氢离子经过电解液到达阴极，电子则通过导体传导到燃料电池外，形成能够用于工作的电流。

空气中的氧气流过阴极时，在阴极表面遇到氢离子和返回的电子，分解并与氢离子和电子结合形成水。

### » 反应物的路径

只要氢气和氧气不断流动，燃料电池就会持续产生电流。电池流场板的作用就是管理这些基本气体的分布。每块板都包括一个微通道结构和一个多孔的子层。当氢

气在阳极板的通道中移动时，也会被驱动通过子层向阳极移动。与此同时，空气通过燃料电池阴极侧的流场板被导入。空气和水通过阴极侧的多孔材料层进行交换，流场板则将多余的空气和水从电池堆中排出去。这些过程都发生在阴极侧，并且是必不可少的，图3为其简化的示意图。

TRINA 团队在他们发表的文章中解释：“流道结构对于化学反应的合理控制至关重要。流体的停留时间或流动分布的均匀性，以及传热效果，都将直接影响流道结构的设计。”因此，燃料电池流场板的两个主要设计目标是使流过流场板微通道的流体，以及穿过多孔材料层的流体都最大化，以便向电极提供足够的反应物。

### » 创建复杂解决方案的简单过程

微通道的排列方式会影响流场板是否能够满足其性能指标。传统的微通道设计通常遵循一些常规的模式。更复杂的流场板结构可以提高其性能，但这样也会花费更多的时间用于设计、制造、测试和调整该设计。

为了优化设计，Zhou 和他的同事们意识到，首先需要调整设计流程。为了针对他们的问题生成一个更高效的复杂解决方案，TRINA 团

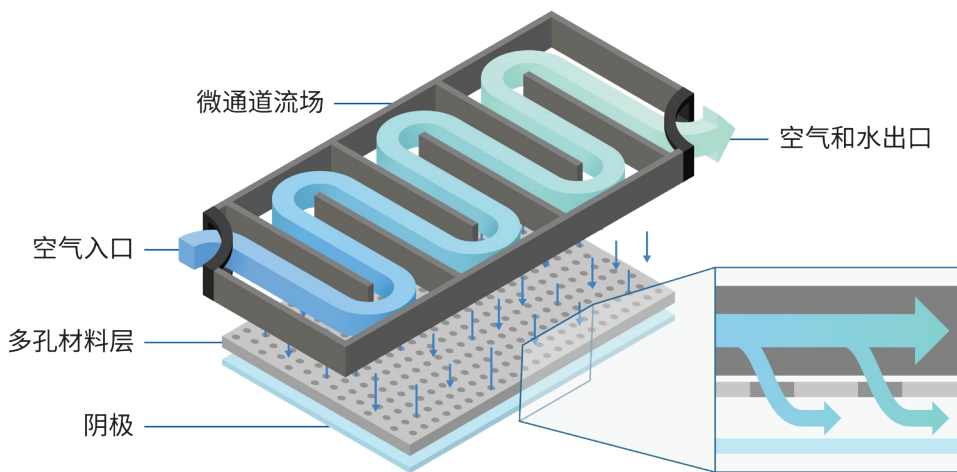
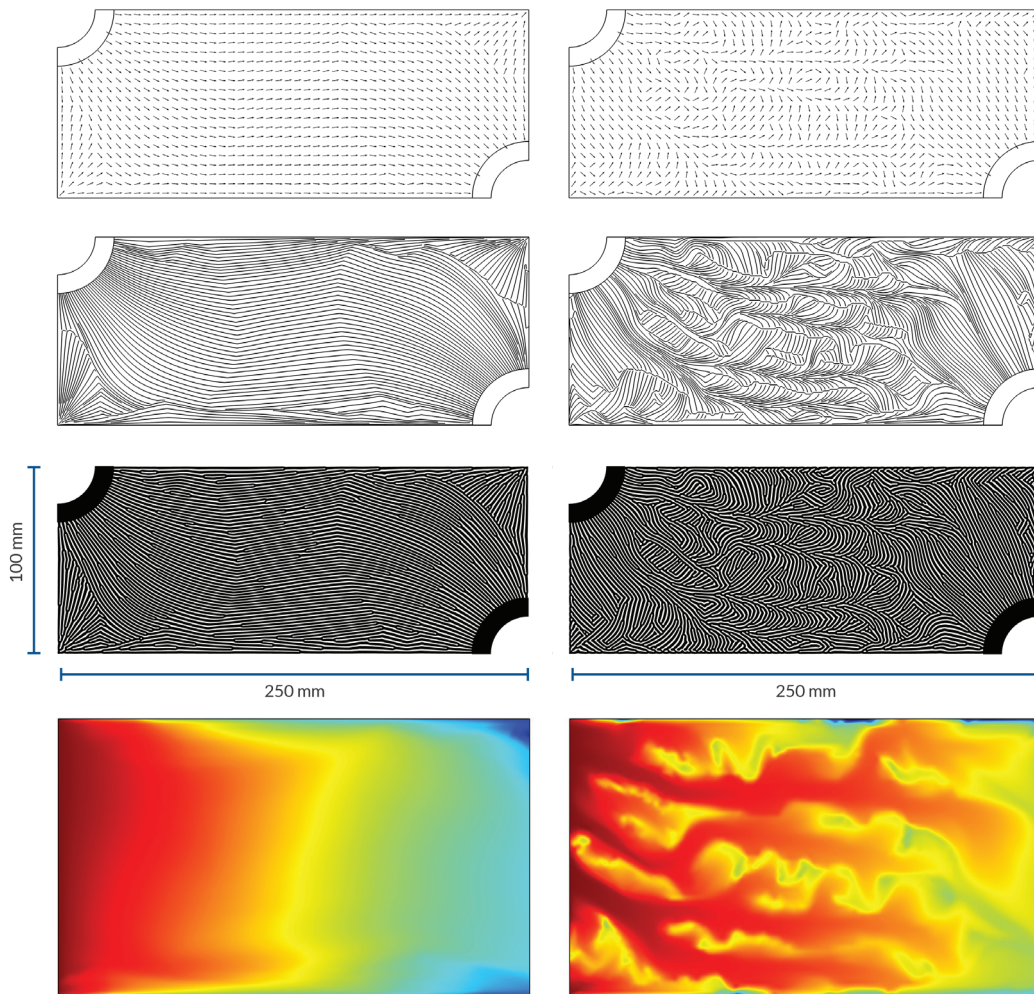


图3 微通道结构（以深灰色显示）定义了反应物流体移动的一个路径。一些流体通过多孔材料层向阴极表面转移。



**图 4** 优化流量的微通道设计 (左)。优化反应的微通道设计 (右)，这个方案的特点是混合了一级“动脉”和二级“毛细管”。动脉用于维持向出口的整体流动，而毛细管能使反应物更广泛地分布在电极上。对于这两种情况，流体都是从左上角的入口流向右下角的出口。

队开发了一种由仿真驱动的基于目标的设计方法，即在测试前不是定义结构和形式，而是设定关键参数，然后指导算法生成满足这些目标的形式。

“我们正在寻求能够表述复杂模型中内容的近似方法。这虽然牺牲了一些模型的细节，但能够使我们在更短的时间内探索更复杂的设计。”Zhou 介绍道。“有些人使用拓扑优化来处理这样的问题，可能会得到 10 个通道的设计方案，这是因为他们要求算法需要确定通道的每个物理单元的确切位置，而实现这种复杂的设计需要大量的计算资源和时间。”Zhou 补充道。

### » 基于期望结果的新颖设计

那么，TRINA 团队是如何使用基于目标的设计方法高效地生成更好的微通道设计呢？首先，他们模拟了通过有效各向异性多孔材料的理想化流动轨迹，然后提取了描述理想化流体行为的参数值。接着，将这些数值输入到另一个模型中，用于生成会

产生这种行为的微通道形式。实际上，他们在设计结构之前就确定了设计需要产生的效果。

Zhou 解释说：“我们使用 COMSOL 建立的多孔材料模型只有两个材料值和一个非常粗糙的网格，我们基于纳维-斯托克斯和平流-反应-扩散方程实施了一个基于灵敏度的优化过程。假设稳态、不可压缩的层流流过多孔介质，并且所需的化学反应将与反应物浓度相关。运行这些模拟后，我们得出了通过孔隙的流体流动方向的最佳分布。这个过程不仅极大地降低了计算的复杂性，而且生成的结果非常有价值。”

Zhou 将整个设计过程中的这一部分描述为“均质化”。在建立了流体通过板块孔隙的理想轨迹模式后，下一步就是“非均质化”。这一步骤将涉及迫使流体遵循这些基于方程定义的最佳路径的微通道形式。

### » 生成式设计使流量和反应最大化

Zhou 表示，之所以需要非均质化步骤，是因为“我们无法加工出针对每个孔隙进行单独设计的理想多孔材料。我们需要安装壁和通道，以接近理想化的方式引导流体通过孔隙。为了生成这种设计，我们使用 COMSOL Multiphysics® 求解了一个

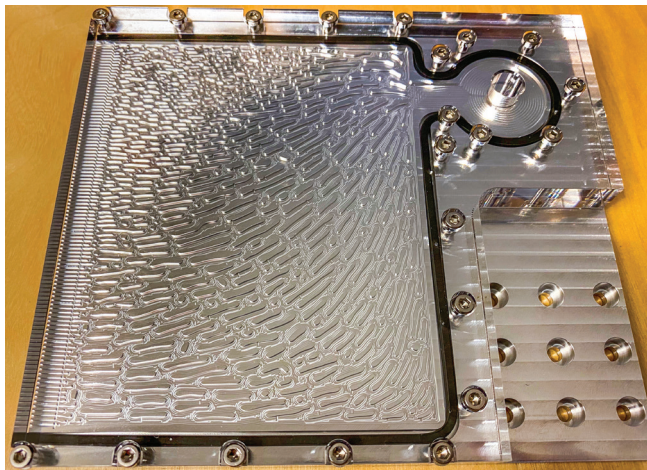


图5 基于 TRINA 团队的生成式设计制作的一种金属流场板物理原型。

自定义的偏微分方程来生成图案样式。COMSOL 软件还具有绘图功能，可以直观地展示结果。”

TRINA 团队基于非均质化方程创建的两个复杂的解决方案如图 4 所示。他们的目标是：减少反应物流动的阻力；加强整个流场板的反应物供给和反应的均匀性。这些目标由模型偏微分方程中的控制变量表示。通过为这两个目标分配不同的权重系数，Zhou 和他的团队可以引导模型生成不同的设计方案。然后，他们评估每个方案的相对优势并进行调整，以产生进一步迭代。

对于图 4 左图所示的设计，Zhou 表示：“我们称之为‘流动设计’，因为流体流经它时引起的压力变化最小。这主要是由于该设计所生成的路径相对平行和笔直，没有太多的侧分支。”

虽然这种设计能使流体

在流场板上高效地流动，但是它在通过多孔材料层均匀地分配反应物方面不太理想。模拟结果显示，该设计的出口侧的反应物浓度较低，可能会降低反应的均匀性和燃料电池的结果输出功率。

如果调整控制方程中的权重系数，使其优先考虑反应的均匀性，该模型将生成一个如图 4 右图所示的设计，Zhou 称之为“反应设计”。高浓度的反应物（图 4 右图中以红色和橙色显示）现在占主导地位，表明将有更大比例的反应物被用于反应。对生物学专业的学生来说，微通道“反应设计”的复杂形式可能看起来很熟悉。

“大多数商业微反应器会采用与‘流动设计’类似的设计。”Zhou 说道。但是如树叶、肺和血管等自然发生的分配流体反应物的系统，更接近图 4 右图的形式。

“工程师们可能更喜欢

## “工程师们可能更喜欢使用没有侧分支的直通道，但大自然选择了‘反应设计’。”

—— YUQING ZHOU, 研究员, 丰田北美研究院

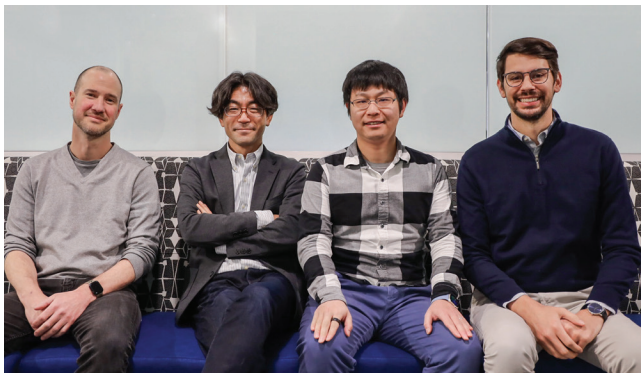
使用没有侧分支的直通道，但大自然选择了‘反应设计’。”Zhou 总结道。TRINA 团队的研究论文指出，虽然有人以前曾尝试过将自然的、分形的或分层的形式优先作为流场通道的选择，但“这是第一次在没有提前规划布局的情况下，使用目标导向的设计方法发现这种大规模的分支流场”。

### » 预测未来，不如创造未来

除了上述显示的“流动与反应”设计的比较外，TRINA 团队还结合图 4 中这些属性生成了另外两个设计（文中未显示）。TRINA 的四次迭

代中的每一次都在关键的反应 - 流体性能指标方面优于基准的常规设计。图 5 显示了 TRINA 团队制作并通过试验测试的另一种设计。

那么，理想的流场板设计是什么？这样的设计也许并不存在，就像没有一种能够取代汽油动力汽车的理想技术一样。“从我们的角度来看，团队的成功在于为工程师提供了更多良好的选择供他们考虑。”Zhou 表示，他分享了一直指引他和同事们的忠告：“我们的首席科学家曾说过，‘我们必须停止尝试预测未来，而是去努力创造未来。’”◎



流场板设计项目的四个核心人员。从左到右：Ercan M. Dede, Tsuyoshi Nomura, Yuqing Zhou, Danny J. Lohan. Nomura 来自日本丰田中央研发实验室，其他人在丰田北美研究院工作。

COMSOL, 美国

# 通信系统的基石： 射频 MEMS 谐振器

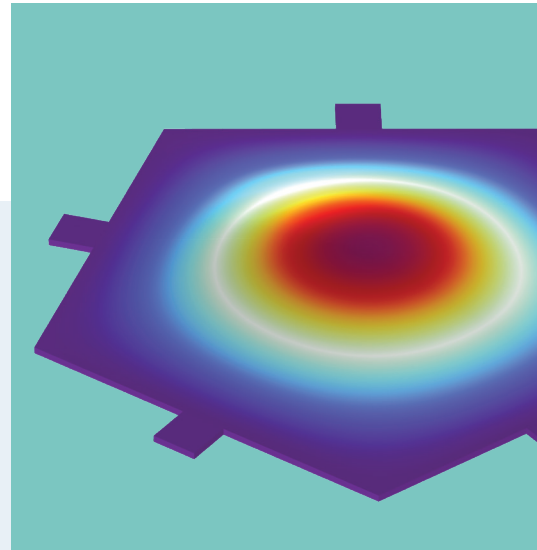
作者 JOSEPH CAREW

手持设备能够在当代普及离不开 MEMS 谐振器的发展，因为机械谐振器可以做得比 RLC 电路小得多。MEMS 器件的成功故事并不止于此，制造商们仍在不断创新，最新的趋势是将 5G 通信功能集成到手持设备中。MEMS 谐振器是这一进程的重要组成部分，而多物理场仿真对于这类器件设计的持续创新具有重要价值。

在产品开发周期中，制造 MEMS 器件原型包括许多成本高昂的加工工序。多物理场仿真加快了研发人员对产品的学习周期，同时减少了制造物理原型的需求。此外，由于元件最终要与电子电路集成，制造商还需要将谐振器集成到电子系统，而不是孤立地进行设计。

如今，射频 MEMS 器件已经成为通信系统的重要组成部分。在较低的频率（如 2.5 GHz）下工作的声表面波（SAW）谐振器是这类器件中最早的代表，后来发展的体声波（BAW）谐振器可以处理更高的频率（如 8 GHz），设计也更为复杂。在这类谐振器中，还有薄膜体声波谐振器（TFBAR 或 FBAR）和固态装配谐振器（SMR）等变体。兰姆波谐振器（LWR）结合了声表面波谐振器的叉指换能器和体声波谐振器的悬浮结构，从而实现了二者的优点，但它的设计更复杂。这就突出了多物理场仿真的作用，特别是当其中涉及到机电耦合时。

为了展示在射频 MEMS 器件设计过程中使用多物理场仿真的优势，我们使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发了三个模型。



## 薄膜体声波谐振器

如今，大多数智能手机中都包含薄膜体声波谐振器的应用，例如，它可用在智能手机的 RF 滤波器中，支持频率的传输和接收。

以最大程度地限制振动能量为目标，我们开发了一种五边、带光栅薄膜体声波谐振器的多物理场模型。该模型被设计为具有约 3.25 GHz 的串联谐振频率，并由以下堆叠组件构成：氮化硅支撑层、钼底部电极、氮化铝压电层和铝顶部电极。该谐振器被悬挂在锚点或标签上，由位于一对电极之间的压电薄膜材料产生体声波。

为了确保最终设计的薄膜体声波谐振器的有效性，在最初设计阶段就需要进行精确模拟以预测谐振频率和其他性能指标。使用的材料以及薄膜体声波谐振器的整体布局都会影响其性能，在投资制造物理原型之前，多物理场仿真是评估设计的一种高效方法。

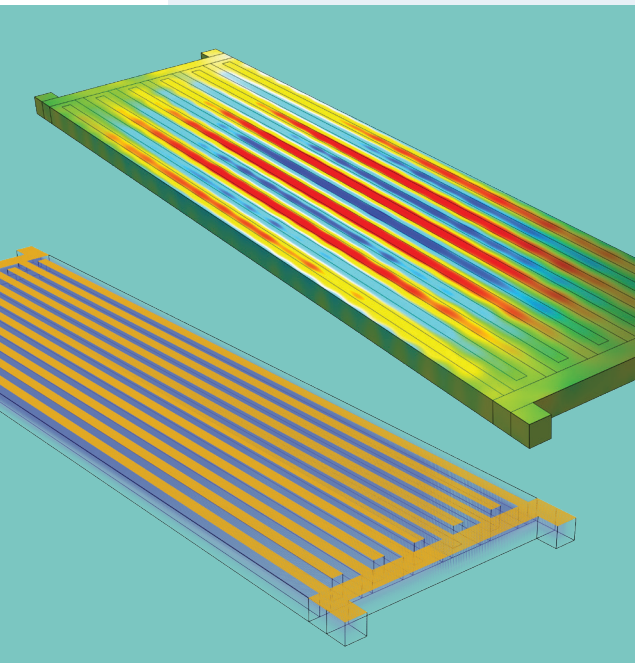
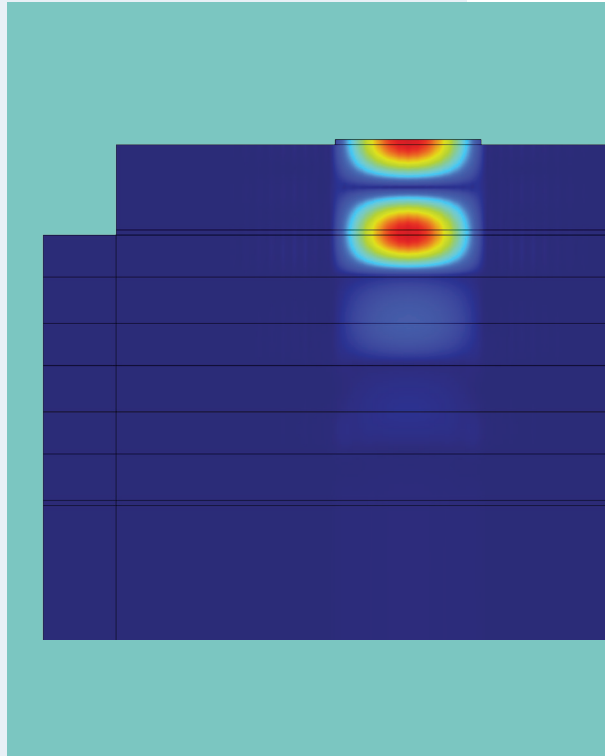
## 固态装配谐振器

作为薄膜体声波谐振器的一种类型，固态装配谐振器非常坚固耐用，其谐振频率通常高于同类型体声波谐振器产品。这类器件的声镜部分由具有高低声阻抗的材料交替层组成，可将声能限制在压电有源层内。固态装配谐振器还可用作 RF 滤波器、振荡器、致动器和传感器。

右图中显示的固态装配谐振器是在一个厚基底上的声镜顶部形成的微机械压电 MEMS 谐振器模型。在这个二维模型中，钼层（高阻抗）和二氧化硅层（低阻抗）交替存在，但实际配

置模式可能会有所不同。固态装配谐振器的交替层增加了制造过程的复杂性，仿真可用于优化镜面材料的厚度，实现最大的声反射率和能量限制，还可以用于了解制造过程的变化对器件参数的影响。

随着全球向 5G 过渡并期待 6G 的到来，固态装配谐振器和薄膜体声波谐振器面临的设计挑战日益严峻。为了满足谐振器对更高的工作频率、更宽的带宽和更高的 Q 因子的要求，需要进行更精确的多物理场仿真。



## 兰姆波谐振器

兰姆波谐振器由于结合了体声波谐振器和声表面波谐振器的优点而备受关注，它既解决了声表面波谐振器面临的低谐振频率限制和集成的问题，又解决了压电体声波谐振器面临的多频能力问题。例如，氮化铝 (AlN) 兰姆波谐振器具有出色的功率处理能力和高 Q 因子。

考虑到氮化铝是声波传输的最佳选择，我们建立了一个氮化铝兰姆波谐振器的多物

理场模型。兰姆波谐振器在射频 MEMS 器件中仍然相对较新，也是本文介绍的器件中最复杂、功能最强大的一种。在实际应用中，它可能具有多种电极配置模式以达到实际所需的效果。

电极模式与器件性能之间的复杂关系使器件仿真具有一定的挑战性。此外，损耗机制（如锚损耗）会影响性能，也需要考虑在内。对于这些需求，多物理场仿真都可以满足。



图 1 为确保混凝土结构的强度和耐久性，承包商必须考虑天气条件等影响混凝土性能的因素。

海德堡材料，挪威 & 瑞典

# 多物理场仿真进驻施工现场

时间、温度、材料选择、天气条件和浇筑技术都会影响建筑用混凝土的性能。为了帮助客户了解关键变量对项目的影响并做出明智的决策，海德堡材料通过一款编译的仿真 App 来使用多物理场仿真模型的预测功能。

作者 ALAN PETRILLO

从普通住宅到高耸的桥梁和摩天大楼，混凝土是无数建筑物的基本组成部分。为了实现混凝土的预期寿命，工程承包商必须在施工过程中做出正确的决策，以确定影响混凝土长期强度和耐久性的浇筑过程中的硬化或成熟速度。

承包商可以通过成熟度法预测混凝土浇筑过程可能产生的结果，但在施工现场应用这一技术比较困难。因此，全球最大的水泥、骨料、预制和预拌混凝土供应商之一，海德堡材料 (Heidelberg Materials) 为其瑞典和挪威的客户开发了一款名为 HETT 的计算机程序。他们参与了 HETT 的多次迭代开发，但与以往版本不同，新版本 HETT<sup>22</sup> 是一款编译的仿真 App，可基于考虑了现场条件、环境温度、材料选择和其他相关变量的多物理场模型提供实时的预测结果。

HETT<sup>22</sup> 及其相关模型是由 Deflexional 公司为海德堡材料创建的，该公司是 COMSOL 的一家认证咨询机构，专门使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发多物理场模型和仿真 App。Deflexional 使用 App 开发器将上述产品相关的仿真模型转化为定制的仿真 App，并通过 COMSOL Compiler™ 进行了部署。在 HETT<sup>22</sup> 应用程序推出后的 6 个月里，下载次数就超过了 1100 次。



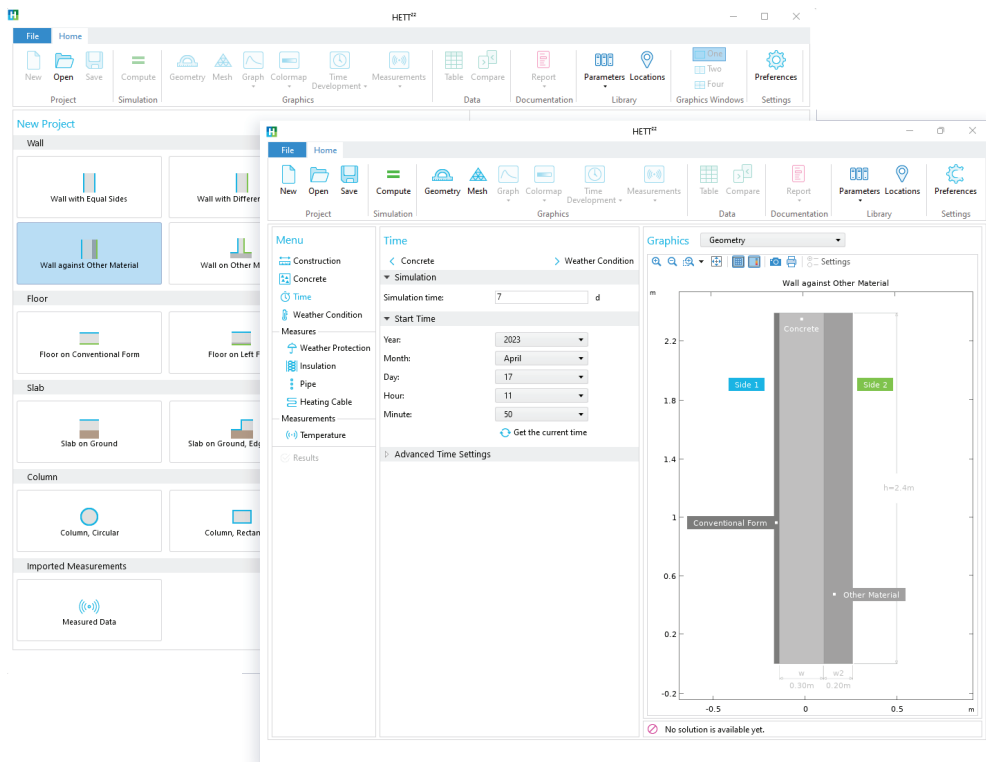


图 2 仿真 App HETT<sup>22</sup> 显示了一个示例模型的构建过程。

海德堡材料瑞典水泥公司 (Heidelberg Materials' Cement Sverige, 前身为 CEMENTA 公司) 负责 HETT 项目的项目经理 Mikael Westerholm 介绍说:“HETT<sup>22</sup> 可以帮助您从不同角度评估各种选择。通过仿真预测水泥早期成熟过程的可能结果, 能够使承包商在做出决策之前对施工方案的选择更有信心。”

### » 权衡时间、温度与水泥水化

虽然有多种因素会影响控制混凝土成熟度和强度发展的化学过程, 但其中温度的影响尤为重要。

“水泥水化是水泥和水之间的化学反应, 这一过程会产生大量热量, 导致水泥在硬化过程中的温度升高。”海德堡材料挪威水泥公司 (Heidelberg Materials' Sement Norge, 前身为 Norcem 公司) 的技术经理 Tom Fredvik 解释说, “水泥的水化速度与温度密切相关, 温度越高, 水化速度就越快。”

快速水化并不一定可取。在炎热天气下快速固化的混凝土很可能比在凉爽条件下缓慢固化的混凝土强度更低。反之, 零度以下的温度也会影响强度的发展。“将这些影响纳入考虑中是非常重要的, 尤其是在冬季进行浇筑时。”Fredvik 说道, “最坏的情况是, 如果混凝土在获得足够的强度之前就已经冻

凝土浇筑后通过在中心取样来确定其强度。”

成熟度法将已知的度量指标与施工现场和项目的具体数据相结合。承包商可以提前获得成熟度函数值和混凝土拌合物的参考强度, 但必须对混凝土在固化过程中需要经历的温度进行估计。预估的温度曲线需要考虑环境温度和水泥水化产生的内部热量, 因为实际温度分布在混凝土铸件内并不一致, 这意味着强度的发展也可能不均衡。

### » 多物理场仿真技术助力承包商

为了更广泛地利用仿真的预测潜力, 海德堡材料委托 Deflexional 公司开发了最新版本的 HETT。Deflexional 的首席执行官 Daniel Ericsson 说道:“当海德堡团队阐述他们的目标时, 我们看到了扩大 HETT 用途的绝佳机会。”HETT<sup>22</sup> 是使用 COMSOL Multiphysics 软件中的 App 开发者创建, 并通过 COMSOL Compiler™ 编译的第一代仿真应用程序。

“对于 HETT<sup>22</sup> 的开发, 我们希望尽可能方便用户使用。我们还增加了新的功能, 使客户能够考虑更多实际情况中的细节。”Fredvik 补充道。

图 2 通过一个假想的混凝土浇筑项目, 演示了

结, 可能会遭受永久性的霜冻破坏。”

承包商可以对模板进行隔热处理, 并在裸露的混凝土表面覆盖保温材料, 甚至可以增加外部热量, 以降低冻结风险。但这些技术必须谨慎使用, 以避免过热、过早干燥或大幅增加施工项目成本。

### » 用成熟度法预估强度发展

在采用特定的热管理措施前, 承包商可以使用成熟度法来预测可能的结果。“使用成熟度法预估温度对混凝土强度发展的影响已有 50 多年的历史了。”Westerholm 介绍说, “这是一种无损预测强度的方法, 否则只能在混

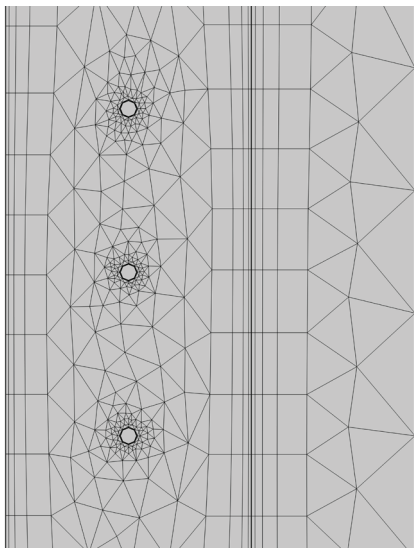


图 3 一个墙壁模型的二维边界层网格。

HETT<sup>22</sup> 的扩展功能。首先，仿真 App 的使用者可以从代表不同施工场景的典型案例列表中选择合适的类型，然后定义浇筑的几何形状、材料组合、混凝土强度等级、时间范围和预期的天气条件。之后，这个仿真 App 就可以进行计算来分析周围的物理环境对浇筑行为的影响。

“在已有的预制板上浇筑混凝土时，新旧浇筑件之间的连接非常关键，HETT<sup>22</sup> 使我们能够分析接缝周围的情况。” Fredvik 说道。也可以将其他可能影响混凝土温度和强度发展的物理属性纳入模型中，例如，铸件内部是否存在加热电缆或冷却管。模型的几何结构及其网格如图 3 所示。

在定义了模板和几何结构后，用户可以为已列入计划的浇筑项目收集特定地点的天气预报（图 4），或者也可以自动下载全球天气预报并将其转换为模型所需的适当边界条件。“除了提前选择天气，我们还可以向 HETT<sup>22</sup> 提供养护期间的现场温度记录，然后在测量条件与预期条件有显著差异时进行调整。” Fredvik 介绍说。

时间上的限制和预期强度是影响用户选择材料的关键因素。“在这个示例中，强度要求设定为 15 MPa，然后才能拆除模板。” Westerholm 解释说，“因此，我们从软件内置的材料

库中选择了具有合适强度发展的混凝土。用户还可以选择与混凝土混合的诸如粉煤灰、粒化高炉矿渣和硅灰等辅助胶凝材料。”

这些材料是能源生产、铁和硅铁加工等其他行业的副产品。在水泥中使用辅助材料或将其作为混凝土的添加剂，有助于降低混凝土建筑的总体碳足迹（碳足迹指人类的活动中排放的 CO<sub>2</sub> 和其

他温室气体的总量）。“减少 CO<sub>2</sub> 排放是全球混凝土行业的重点，但这些替代材料可能会减慢水化速度，并具有不同的强度发展特性。我们希望 HETT<sup>22</sup> 能够帮助用户预测他们可能不熟悉的混凝土行为。” Westerholm 表示。

### » 借助仿真结果预先调整方案

在 COMSOL 仿真模型的帮助下，HETT<sup>22</sup> 得以运行

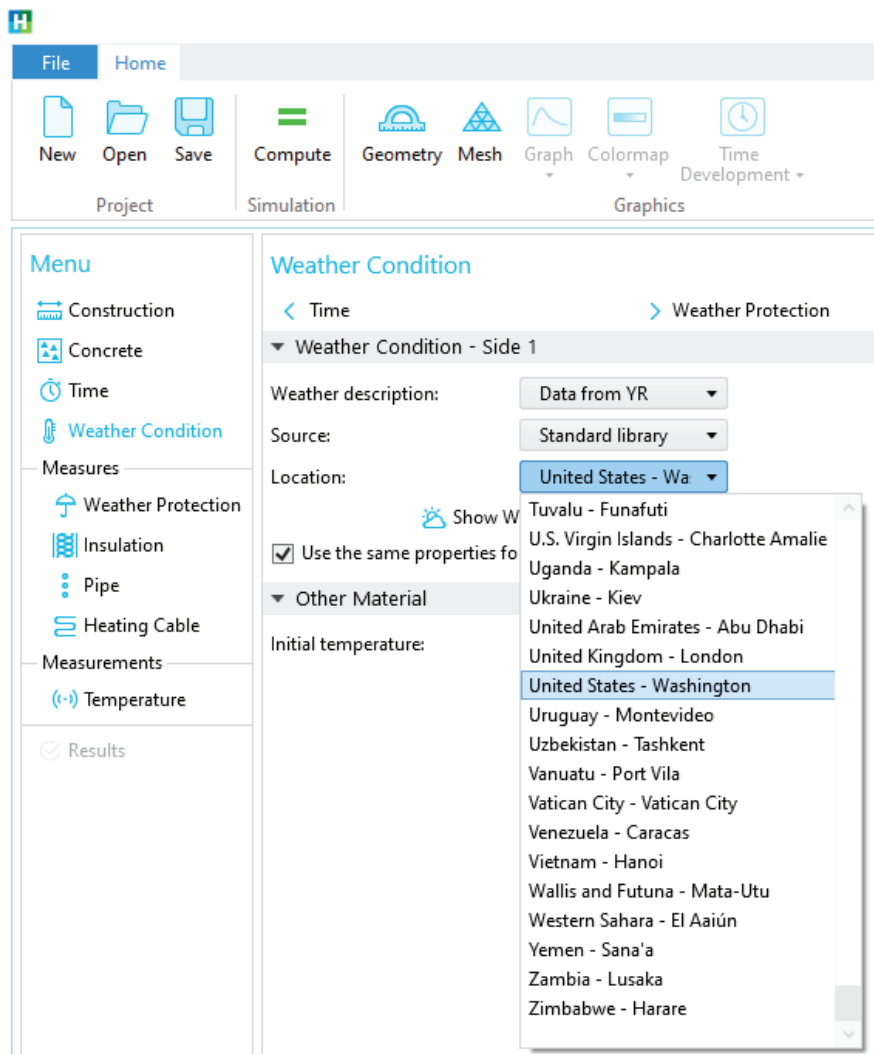


图 4 仿真 App 用户可以从下拉菜单中选择预报的天气条件，也可以指定一个包含经度和纬度的地点。

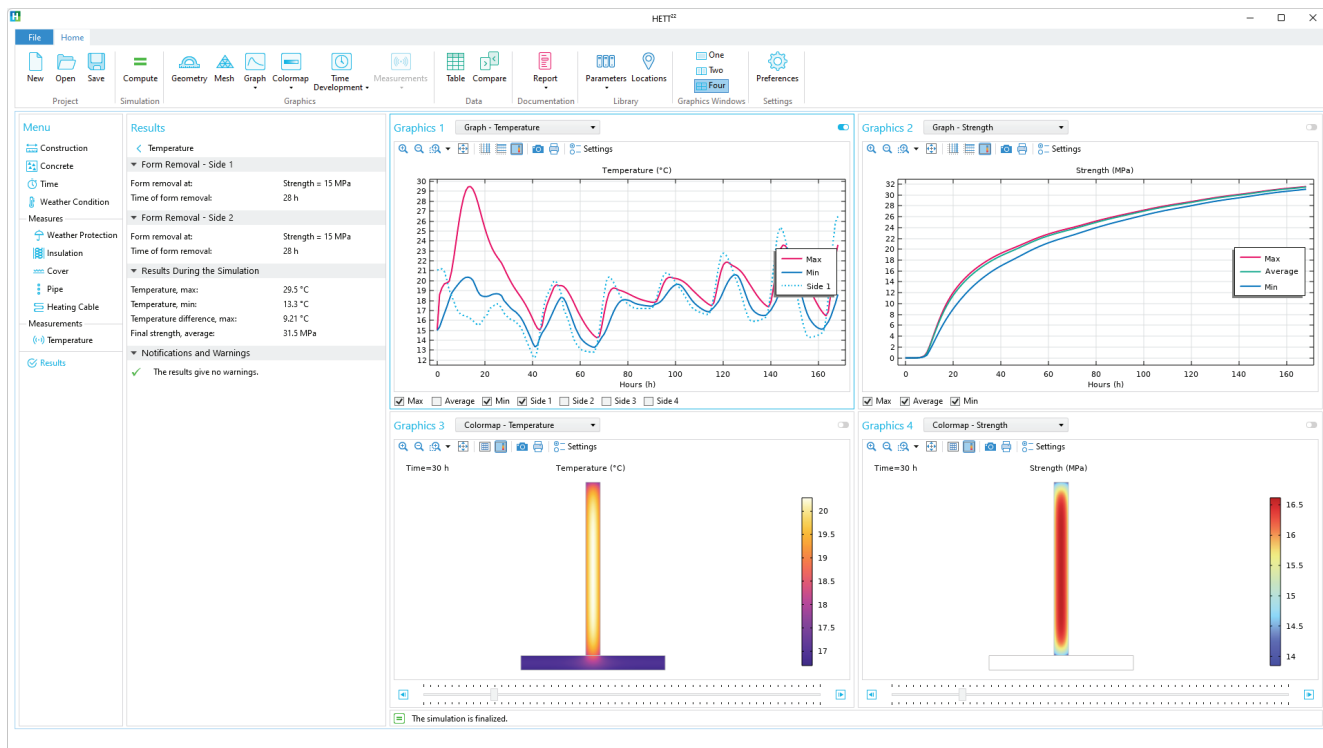


图 5 模拟结果显示了在特定情况下混凝土内部的浇筑温度，以及随时间变化的强度发展曲线。

并能生成预测值，用于确定在拆模前达到预期强度（本例中为 15 MPa）所需的时间。“我们可以追踪周围空气和土壤的预期温度，并预测混凝土本身的温度曲线。根据温度变化情况，我们计算出整个浇筑过程需约 30 小时才能达到我们所需的强度（图 5）。”Fredvik 解释说。如果这个时间对于这项工作来说太长，那么 HETT<sup>22</sup> 可以显示不同的混凝土选择方案对预计拆

模时间的可能影响。建筑商可以从海德堡材料的混凝土产品菜单中选择不同的方案，并直接在仿真 App 中查看每种方案性能特征的详细信息。

如果实际的天气与预报的不同怎么办？对于这种情况，用户可以通过调整温度值来了解温度变化对强度发展的影响。“如果天气发生显著变化，我们有可能更早地拆除模板。”Fredvik 说道。

## » 多物理场仿真支持成本效益分析

通过预测与施工现场条件相关的方案选项所产生的影响，施工团队可以使用编译的仿真 App 更好地管理每个项目的经济效益和碳足迹。例如，如果天气预报显示气温较低，那么使用低碳混凝土进行浇筑将需要较长时间，这表明承包商需要对成本和效益进行权衡。

Westerholm 会据此询问承包商：“您是否应该改用固化速度更快的水泥或强度更高的混凝土，即使这样做成本更高，而且碳足迹也可能更大？或者是否坚持最初的计划，采取保温或加热模板

的措施？”

海德堡材料为客户提供了数百种可能的混凝土配方。从公司的角度来看，仿真 App 为解决一系列让人却步的复杂问题的解决方法提供了必要补充。通过仿真 App 的定制界面呈现出 COMSOL Multiphysics 软件的模拟预测功能，可以帮助用户更高效地做出明智决策。

“这就是我们为客户开发这款仿真 App HETT<sup>22</sup> 的初衷。”Fredvik 总结说，“因为在混凝土浇筑工作的每一个决策点上，它都能为客户提供有价值的帮助，因此它也是我们技术支持服务的核心部分。”

**“这是一种无损预测强度的方法。”**

—— MIKAEL WESTERHOLM, 项目经理, 海德堡材料

INFICON, 列支敦士登

# 借助仿真优化电离真空计性能

为了开发一种性能更优的测量高真空或超高真空环境压力的电离真空计, 列支敦士登的仪器制造商 INFICON 公司使用多物理场仿真来测试和优化新的设计。

作者 ALAN PETRILLO

创新已经成为了一种竞争形式。标准化的工具会被用于衡量走向竞赛终点的进程。对于大多数追求技术创新的人来说, 电离真空计就是这样一种必不可少的工具。

高真空或超高真空 (HV/UHV) 环境常用于许多产品的研究、精炼和生产。但是工程人员如何才能确保工厂真空室中的压力与其他工厂的真空室保持一致呢? 如果没有统一的标准和可靠的工具来进行衡量, 真空室和被测试产品的关键性能指标

就不具备可比性。

## » 全球性竞争产生制胜原型

由 INFICON 公司设计和生产的电离真空计 080 (IRG080) 是一个国际合作项目的成果, 该项目旨在开发一种用于测量高真空或超高真空环境压力的高性能工具。

这个电离真空计由欧洲计量创新和研究计划 (European Metrology Programme for Innovation and Research, EMPIR) 项目统筹开发, 这个项目由私营公司和政府研究组织合作开展, 旨在帮助欧洲的“研究和创新系统在全球更具竞争力”。项目参与者在比较了多种设计后, 一致认为 INFICON 的设计最符合性能的要求。

## » 通过电离确定气体密度

“几乎所有的高科技产品都涉及真空工艺。” INFICON 公司的传感器技术主管 Martin Wüest 感叹道。

术语“真空”理论上描述的是不存在任何物质的空间, 但实际上空间的真空通常是一个程度问题。测量不同的真空程度, 需要使用不同的方法来确定压力。“在接近大气压的状态下, 你可以使用电容式隔膜真空计进行测量。” Wüest 介绍, “在中真空状态下, 可以测量通过对流发生的热量传递。”但是, 这两种方法在高真空或超高真空的压力水平下都会失效。

“在高真空或超高真空环境下, 缺少足够的粒子来驱动隔膜移动, 也无法准确地测量热量传递, 因此我们使用电离来确定气体密度和相应的压力。” Wüest 解释道。



图 1 电离真空计 IRG080, 图片由 INFICON 提供。



图 2 Bayard-Alpert 热丝极离子真空计, 图片由 INFICON 提供。

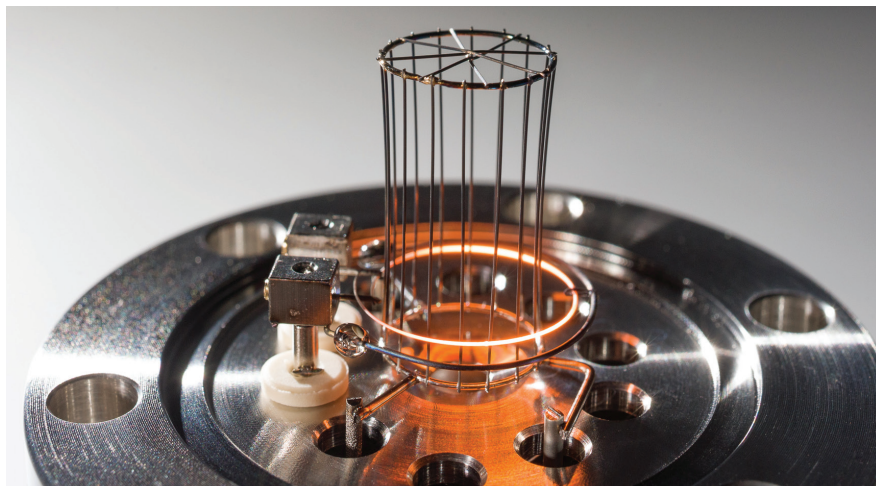


图 3 INFICON 公司开发的 IE514 电离真空计的物理原型。

放置在真空室内的 Bayard-Alpert 热丝极离子真空计 (图 2) 是一种最常用的高真空或超高真空压力测量工具, 该装置由灯丝、加速栅极和离子收集器组成。在测量时, 装置首先向灯丝施加低压电流使其升温, 随着灯丝变热, 它所发射出的电子将被电场力吸引朝着被施加了高电压的栅极运动。一些流向栅极和在栅极内的电子与在真空室中的气体分子发生碰撞, 从而产生离子, 离子则会流向收集器。一般情况下, 收集器中由离子产生的电流与腔室中气体分子的密度成正比。

“根据理想气体定律, 我们可以将气体密度转换成压力。” Wüest 继续解释说, “压力正比于离子电流和电子电流的比值, 而反比于灵敏度系数, 该系数取决于真空腔室内的气体种类。”

### » 现有的电离真空计对温度和操作方法非常敏感

需要注意的是, Bayard-Alpert 电离真空计的校准很容易受到日常操作的影响。

“典型的电离真空计包含由弹簧加载张力的精巧金属结构。” Wüest 介绍说,

“每次使用该设备时, 灯丝都会被加热到 1200 ~ 2000 °C。这会对弹簧中的金属产生影响, 并使灯丝的形状发生变化, 导致电子流的起始位置和电子的路径发生改变。”

对热的敏感度使得 Bayard-Alpert 电离真空计的核心部件很容易发生错位, 并可能引入 10% ~ 20% 的测量误差。“因此, 大多数真空系统都是被过度设计的, 而且频繁地对仪器进行重新校准也会浪费宝贵的开发时间和资金。” Wüest 补充道。

### » 建立基准设计的仿真模型

当使用这种真空计检测氮气时, 项目团队希望将测量的不确定性控制在 1% 或更低。另一个重要的目标是需要消除对每个仪器及每种被检测气体的气体灵敏度系数的重新校准。新设计的设备性能需要能够不受轻微冲击的影响, 并且可由多个厂商进行制造。

为了实现这些宏大的目标, 项目团队首先致力于研究高真空或超高真空测量, 包括对 260 项相关研究进行审查。在完成审查后, 项目合作伙伴选择了一种集合当前电离真空计设计优点的最佳

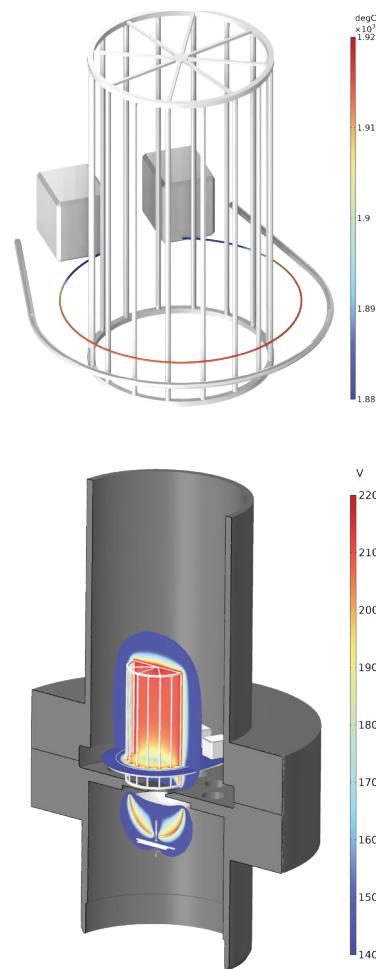


图 4 IE514 电离真空计的仿真结果显示了灯丝温度(上)和栅极结构周围电势(下)。

产品: INFICON 公司开发的 IE514 抽出式电离真空计。INFICON 以及其他两个项目参与者里斯本 NOVA 大学和欧洲研究实验室 CERN 分别开发了 IE514 电离真空计设计方案的仿真模型。团队将每个模型产生的结果与 IE514 电离真空计物理原型的测试结果进行了比较, 以确保在进行新设计之前模型的准确性。

INFICON 公司的工程师 Francesco Scuderi 使用 COMSOL Multiphysics® 软件创建了 IE514 电离真空计 (图 3) 的仿真模型, 不仅能够分析灯丝的热电子发射以及这些电子对气体的电离作用,

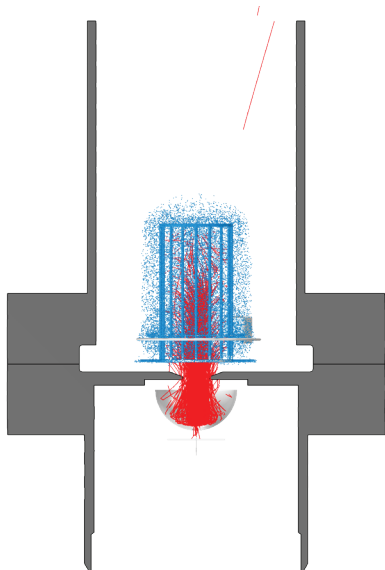


图 5 射线追踪仿真显示了 IE514 电离真空计中电子(蓝色)和离子(红色)的路径。

还可用于对生成的离子流向收集器的路径进行追踪。利用仿真结果, Scuderi 可以基于每次电子释放所检测到的离子数, 计算出一个预期的灵敏度系数, 用于评估仿真模型的准确程度以及是否与实际测试结果一致。

“创建好模型的几何结构并划分网格之后, 我们设置了边界条件。” Scuderi 解释说, “灯丝的温度随着灯丝长度在 1400 ~ 2000 °C 范围内变化, 我们希望能够描述电子发射和灯丝温度之间的耦合关系, 这种热力学上的变化将影响电子的分布及其路径(图 4)。”

“模拟了热场和电场后, 就可以开始进行射线追踪仿真。借助 COMSOL 软件, 我们能够追踪电子向栅极的流动过程以及由此产生的耦合加热效应。” Scuderi 说道。接着, 他们使用该模型计算了与气体粒子碰撞的电子的比例, 并对产生的离子进行射线追踪仿真, 以追踪它们流向收集器的路径(图 5)。

“然后, 我们可以将循环电子的数量

与离子的数量及其位置进行比较, 并由此推断出收集器中的离子电流值, 计算出敏感系数。” Scuderi 总结道。

INFICON 通过仿真模型得到的结果与使用样机测试的结果高度一致, 这使团队能够观察到改变模型设计将如何影响包括电离能量、电子和离子的路径、发射和传输的电流, 以及灵敏度在内的关键指标。

### » 仿真带来更稳健的测量

INFICON 公司设计的最终产品 IRG080 电离真空计采用了许多与现有的 Bayard-Alpert 电离真空计相似的部件, 但关键部位明显不同。例如, 新设计的灯丝是一个固体悬浮盘, 而不是一根细丝; 加速栅极不再是一个精细的金属丝笼, 而是由更稳定的成型金属部件制成; 收集器则由两个部件组成: 一根吸引离子的单针或单棒, 一个有助于引导电子从收集器流向法拉第杯的固体金属环。这种新的布局排列是借助 COMSOL Multiphysics 软件的射线追踪仿真功能进行了设计上的优化, 更好地分隔了离子和电子的路径, 从而提高了精确度。

测试结果表明, IRG080 电离真空计实现了将测量不确定性降低到 1% 以下的目标。在灵敏度方面, IRG080 电离真空计的性能是基准设计的 8 倍。更重要的是, INFICON 电离真空计的原型在多次测试中都得到了一致的结果, 其灵敏度的可重复性是基准设计的 13 倍。整个项目共制造并测试了 23 个相同的电离真空计, 验证了 INFICON 为高真空或超高真空环境创造了一个更加精确、强大和可重复使用的测量工具。

在电离真空计项目完成时, INFICON 团队举起了一个令人印象深刻的奖杯: IRG080 电离真空计。当然, 这次

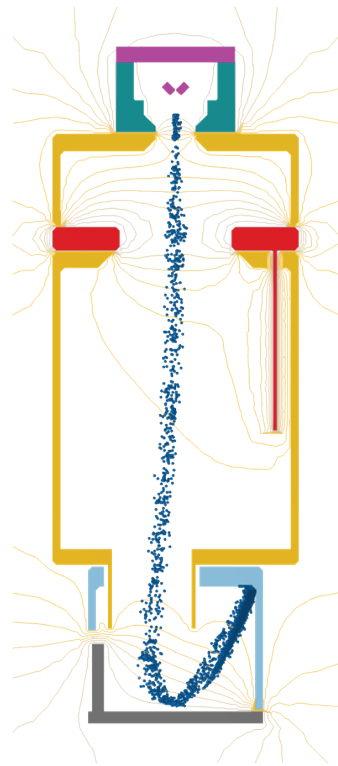


图 6 在 COMSOL 中模拟的 IRG080 电离真空计的模型图。

成功并不是 INFICON 团队独自完成的, 他们的合作伙伴也提供了很多建议和支持。最终, 对于高真空或超高真空环境, 更加精确的测量将使更多的科学和制造领域受益。☺

### 致谢

EMPIR 电离真空计项目的参与者包括 Physikalisch Technische Bundesanstalt, Cesky Metrologicky Institut Brno, Institut za Kovinske Materiale in Tehnologije, Laboratoire national de métrologie et d'essais, RISE Research Institutes of Sweden AB, European Organization for Nuclear Research, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH 和 INFICON Aktiengesellschaft。

COMSOL, 美国

# 小型卫星的 传热仿真

作者 WALTER FREI

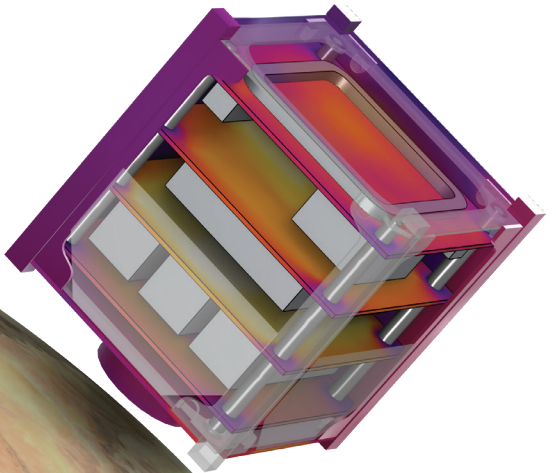


图 1 在轨卫星的传热仿真，显示了卫星的温度分布。地球图片来源：Visible Earth 和 NASA。

过去几年，在轨卫星的数量急剧增加，这主要归功于新发射的卫星体积较小。虽然最大的轨道结构，即国际空间站，比一个足球场还要大，但如今大多数在轨卫星的尺寸都更接近一个足球，部分原因是由于立方卫星 (CubeSat) 外形设计的流行，即所谓的可以装进一个  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  盒子的 1U 卫星。受益于立方卫星小巧的体积，一枚火箭可以发射多颗卫星。虽然此设想最初主要用于学术目的，但现在已经发展为一个可以提供从 1U 到 24U 的设计解决方案的强大商业生态系统，并且立方卫星的使用正在以惊人的速度增长。

立方卫星以及其他小型卫星的特点

之一是设计非常紧凑。许多微型照相机、传感器、仪器、天线、电池、姿态控制系统和其他电子设备都“挤”在一起，会产生不必要的热量，因此设计出能够将热量适当地辐射到周围空间的卫星是工程设计的主要关注点之一。工程师必须确保各种电子元件保持在一定的温度范围内，但这具有一定的挑战性，因为温度梯度会导致不良的结构变形。由于很难进行任何一种真实的飞行前测试，因此设计过程高度依赖数值模拟。

人们可能会认为，只要卫星进入轨道就不再需要数值模型，但事实并非如此。卫星组件常常会因为不明原因失效，而其余的电子元件可能需要以意想不到

的组合方式驱动。卫星运营商仍然需要热模型来预测这种情况下卫星的行为，以达到延长卫星运行寿命的目的。

## » 借助数值模型开展工作

卫星的数值模型通常会涉及求解描述热量传递的控制方程。这些模型可能非常简单，也可能是包括许多几何结构和物理场的高保真模型。最简单的数值模型并不考虑卫星复杂的几何结构，而只在集总意义上计算卫星随时间变化的单一温度。数值分析人员可以在卫星的各个子系统或组件中引入温度变化，这需要他们在模型中引入许多近似、假设和单独的计算。

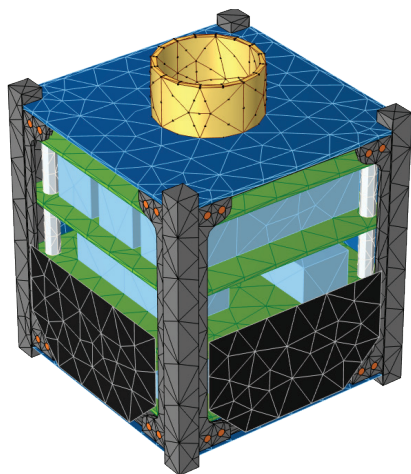


图2 导入的 CAD 几何结构，以及去除特征和简化处理后的有限元网格。

基于 CAD 设计的高保真模型则采用了截然相反的做法，即直接使用 CAD 设计构建几何模型，这样可以避免对简化模型中的每个简化的部分进行繁琐的验证和确认。当然，直接使用 CAD 设计将导致更高的计算成本：这种数值模型会将卫星的几何结构细分为数千甚至数百万个不同的计算单元，因此在使用 CAD 设计时需要权衡利弊。

从历史上看，集总仿真方法有很多优点。以前由于计算机的运算速度相对较慢，因此数值分析人员花费时间来手动地降低计算复杂度对于快速获得结果非常重要，这种方法仍然适用于像国际空间站这样超大型结构的模拟。但对于小型卫星来说，尤其是随着计算成本的不断降低，选择高保真模拟的方法变得越来越有吸引力。

在实际的仿真工作中，传热仿真分析人员通常希望在完全简化模型和高保真模型之间的某个范围内工作。仿真人员可能会在连接部件的界面使用集总热阻来替代每个螺丝钉和紧固件；或是使用均一的属性和内部损耗将芯片或电池



图3 在轨卫星的可视化，显示了相对于太阳和地球的位置和方向，以及对卫星暴露面的辐射。地球图片来源：Visible Earth 和 NASA。

简化为一整块结构。

## » 重要的仿真注意事项

无论采用哪种仿真方法，都需要考虑特定的设置，接下来，我们详细介绍这些要点。

**卫星的几何结构。** CAD 设计和各部件所用材料的热特性，如导热系数、密度和比热，决定了卫星的总热量以及各组件之间的传导传热。卫星表面的相对方位也决定了角系数，即描述一个表面能看到另一个表面的程度。在计算辐射传热时需要计算角系数。除了 CAD 设计之外，还有与几何结构相关的其他信息。例如，两个组件之间的接合面可能会有一层可以改变接触热阻的薄涂层或黏合材料，总热阻也可以是由安装硬件决定的接触压力的函数。

**所有暴露表面的发射率。** 发射率（或吸收率）是衡量表面发射和吸收热辐射能力的指标，可以是波长、温度和入射角的函数。结合使用角系数和表面发射率可以计算辐射热交换。卫星外表面和内部都有辐射，前者还会受到来自太阳和

地球的热辐射等环境热载荷的影响。与波长相关的发射率也特别值得关注。太阳是主要的热源，也是通过太阳能电池为卫星提供电能的唯一来源。太阳发射的光被归类为短波长光，其峰值强度在 500 nm 波长处，大部分能量在 5 μm 以下波长范围内。卫星本身比太阳冷得多，其发出的热辐射波长比太阳波长长得多，主要是大于 2 μm 的波长。正因如此，在卫星上使用与波长密切相关的热涂层非常普遍。在短波长上具有低发射率的涂层会减少受到的太阳辐射热，但如果同一涂层在较长波长上具有较高的发射率，将辐射更多的热量。

**卫星轨道。** 卫星轨道由标准的开普勒轨道要素定义，决定了卫星如何绕地球飞行以及何时进入和退出日食。当卫星进入日食时，不再有任何太阳辐照，这通常会导致卫星外表面温度急剧下降。就热仿真而言，轨道本身通常可被视为周期性的，尤其是位于低地球轨道上的小型卫星。

**卫星方位。** 这一信息决定了卫星的哪个面可以看到太阳、地球或深空。卫星可能指向一个绕其轴旋转的特定方位，甚至有一部分结构会相对于卫星坐标系旋转和移动。这些信息都会影响到卫星暴露面上的辐照。与轨道不同，方位可能不是周期性的。例如，卫星天线可能每隔几个轨道才指向地面站。

**地球和太阳的辐射特性。** 太阳光通量全年都在变化，既会直接入射到卫星，也会从地球漫反射出来。漫反射的程度被称为反照率，在卫星表面变化。地球本身也是红外光辐射体，这种辐射通量可以是经纬度的函数。虽然太阳辐射通量是众所周知的，但反照率和地球红外辐射在卫星表面以及随时间的变化也很大。



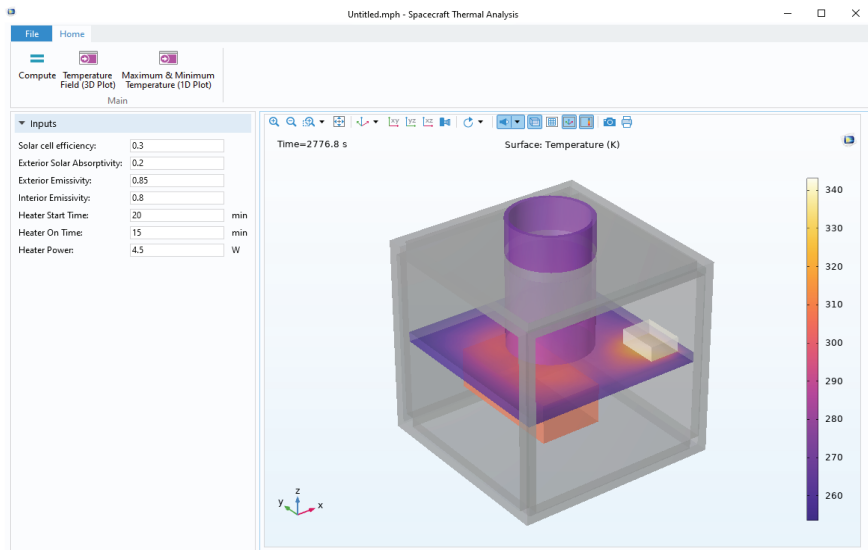


图 4 仿真 App 显示了计算的立方卫星的温度变化。

**元件的电力损耗。**太阳能电池将入射光转换为电能，为驱动电子设备的电池充电。各种电子元件在工作时都会散发热量，这些元件可以连续工作，也可以在特定的预定时间工作，或者在特定的条件下接通。例如，加热器可以由恒温器控制，使元件保持在所需的温度范围内。

所有这些因素在进行数值模拟时都必须考虑在内，这就需要像 COMSOL Multiphysics® 这样高效、可靠的多物理场仿真软件。

## » COMSOL® 中的卫星仿真

传热模块是 COMSOL® 多物理场仿真软件的一个附加产品，包括一个专用于卫星仿真的用户接口：**轨道热载荷**。基于有限元辐射混合方法，该接口功能使工程师能够使用以 CAD 设计为主的方法来建立小型卫星的近似高保真模型。该接口可以与 COMSOL 所有产品无缝集成，提供了一种定义材料属性、载荷和边界条件，提取结果以及为多物理场仿真定义物理场耦合的简单方法。传热模块还具有对流体、相变材料、加热器和热

电效应进行模拟的功能，并可以对集总系统进行仿真。

**轨道热载荷** 接口提供了定义和验证轨道和方位，以及太阳和行星属性的便捷方法。使用双波段辐射模型可以计算太阳、反照率和地球红外辐射，并在太阳（短波段）和环境（长波段）波段之间进行用户选择划分，这样就可以在不同波段指定不同的辐射率。单波段模型还提供了一种简化方法。如果需要更高级别的波段细化，可以使用多波段辐射模型。

COMSOL® 软件既可以读取原生 CAD 文件，也可以通过 LiveLink™ 产品与主流的 CAD 软件双向链接，这样对 CAD 模型的任何更改都会在数值模型中实时更新。在 COMSOL 软件中，工程师可以使用特征去除工具对 CAD 几何结构进行细节清理，或使用软件内置的功能简化网格划分。此外，也可以在软件中创建几何结构。

## » 计算结果

一旦将所有这些信息汇总并输入热数值模型后，计算结果将显示随时间变

化的温度。对于非常简化的模型，这可能只是一个整体温度。对于高保真模型，则会计算所有组件内部的空间温度变化（图 4）。这一信息可用于检查卫星是否保持在所有运行热限制的范围之内。在此基础上，分析人员可能还想进行其他类型的分析，例如计算温度梯度导致的结构变形，以了解这种变形如何改变望远镜的光学性能。这种广泛的数值仿真减少了对物理测试的需求，能让工程师在卫星发射前对自己的设计充满信心。

由于太阳、反照率和地球红外辐射在不同轨道之间几乎是周期性的，因此可以在热瞬态计算之前，先计算一个轨道的总辐射量，而热瞬态计算通常跨越几个轨道。这种运行顺序使得假设场景的测试（如不同的表面发射率组合）变得更加简单。在进行迭代设计时，可以在大型单个计算机上使用软件的 **批处理扫描** 功能，或在集群和云计算资源上使用 **集群扫描** 功能。

一旦设计迭代完成，卫星准备交付，就可以将 COMSOL 数值模型打包成独立的应用程序提供给卫星运营商，以便他们根据需要测试意外的运行条件。

## » 结束语

卫星热管理是一项复杂的设计任务，其运行环境很难在物理测试中复现。有些变量只有通过仿真才能预见，如卫星在轨道上运行时可能出现的温度变化，或机载设备可能产生的热量。COMSOL Multiphysics 是一款综合性的仿真软件平台，具有卫星热分析的专用功能。工程师可以使用它快速迭代和改进设计，验证运行条件，并可以将数值模型开发成仿真 App 与同事和客户共享。🔗

乌特勒支大学, 荷兰

# 腐烂的贝壳 如何帮助海洋 维持碱度

作者 ALAN PETRILLO

海洋生物产生的碳酸钙不仅可以帮助维持海洋的碱度, 还可以作为天然的碳汇吸收人类活动产生的二氧化碳。为了更好地理解这种重要但晦涩的深海生物地球化学过程, 乌特勒支大学的研究员 Olivier Sulpis 开发了一个创新的三维反应迁移模型, 揭示了海洋贝壳如何帮助维持海底沉积物中的天然碳酸钙。

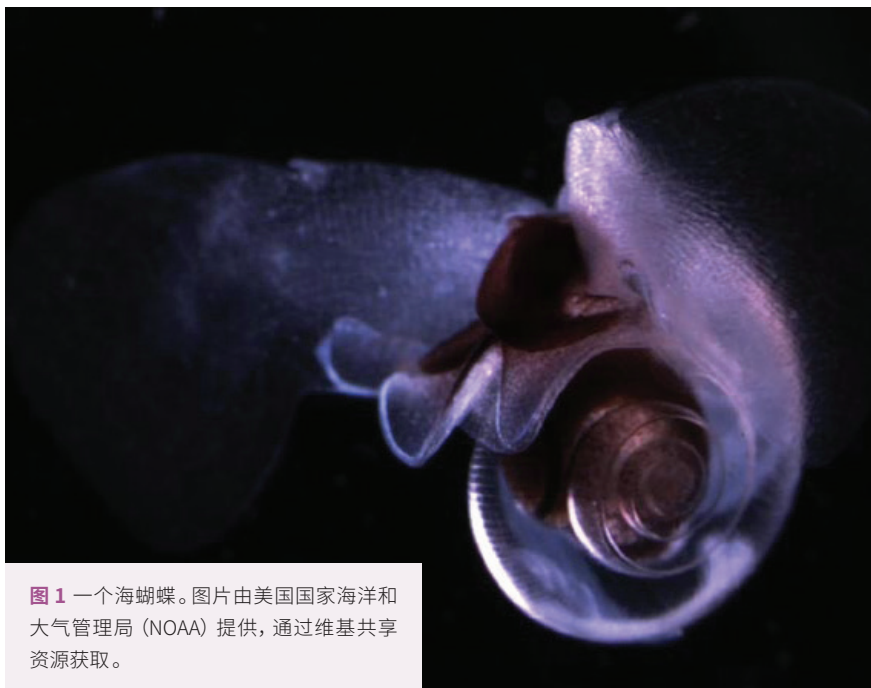


图 1 一个海蝴蝶。图片由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供, 通过维基共享资源获取。

有机生物与环境之间的物理边界在哪里? 通常情况下, 我们的眼睛似乎能够回答这个问题。我们可以从视觉上区分树木和土壤、鸟类和天空, 以及贝壳和海洋, 但表象有时候会骗人。我们也许能看到生物和非生物之间的硬边界, 但往更深处看: 生物体看似坚固的边界, 实际上是一种像织锦一样美丽而深邃的多孔编织结构。

生物体通过与其所生活的环境进行物质交换而成为它们现在的样子, 这种循环也重新塑造了环境。我们的眼睛和大脑很难察觉出发生在分子水平上的反应, 但生命与环境之间相互作用的影响可能是巨大的, 也许和海洋本身一样大。

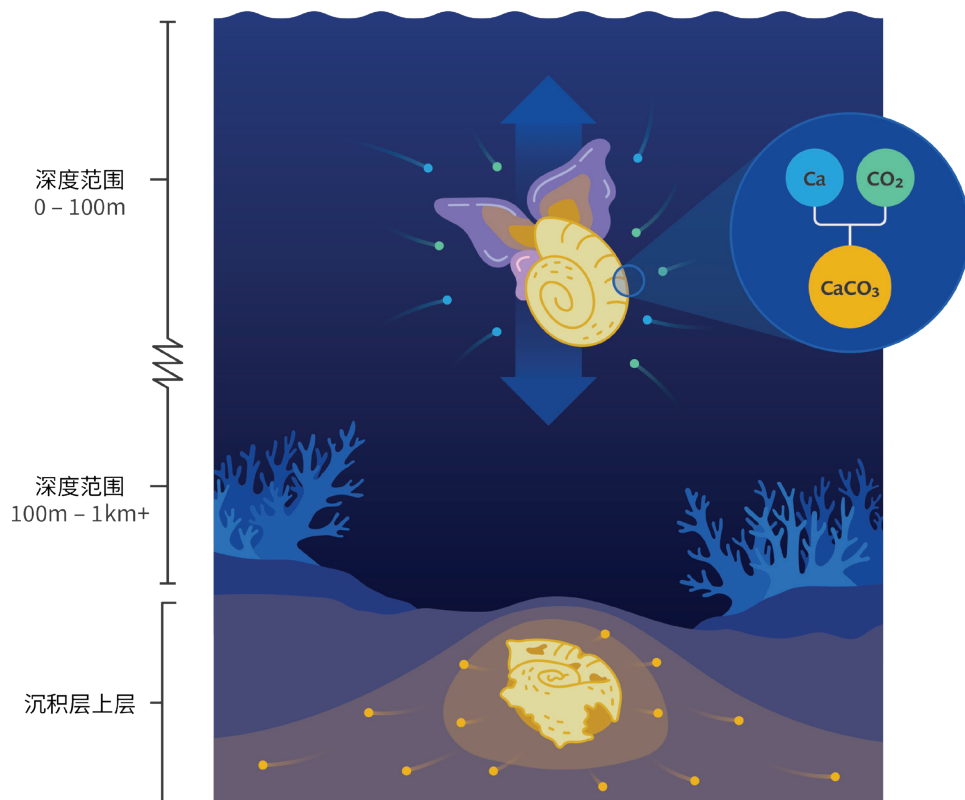


图2 翼足类动物死亡后，它们的碳酸钙外壳会沉到海底并分解。这种分解有助于维持海洋的碱度，并随着时间的推移形成富含碳酸盐的沉积物。

## » 渺小但重要的海蝴蝶

以海蝴蝶为例，“它看起来就像我们在陆地上看到的小蜗牛，但它有翅膀，可以在水里飞来飞去。”荷兰乌特勒支大学（Utrecht University）地球科学系的地球化学研究员 Olivier Sulpis 介绍说。海蝴蝶（也被称为翼足类动物）身长不到 1 cm，它们薄且半透明的外壳由文石（碳酸钙的一种形式）生成。被称为“方解石”的另一种形式的碳酸钙则构成了许多其他贝壳，以及珊瑚的外骨骼。

海蝴蝶和它们生产碳酸钙的同伴们利用海水中的物质合成文石和方解石。“在海水中，到处都是钙和溶解碳，这使得它们成为生物体用于构建晶体结构的理想成分。”Sulpis 介绍说。

## » 碳酸钙生产者在死亡后仍能帮助维持海洋生命

像其他产生碳酸盐的生物一样，海蝴蝶对它们生活的环境有着巨大的影响。翼足类动物死后，它们的文石外壳溶解时会中和一些悬浮在海水中的二氧化碳（酸性物质）。通过这种方式，全球大量的海蝴蝶帮助维持着海洋的碱度。但是，海洋中不断上升的二氧化碳水平可能会破坏海蝴蝶最初生成外壳的

条件，文石生产者数量的减少可能会加剧海水酸化的恶性循环。

“我们常说海蝴蝶是海洋酸化的‘第一反应者’，因为它们是如此地脆弱。”Sulpis 感叹道。虽然海蝴蝶数量众多，但是关于它们的很多事情仍然是个谜，尤其是当它们死亡并沉入海洋最深处后。

## » 消失的文石

虽然方解石是海洋中最常见的碳酸钙化合物，但在 Sulpis 看来，文石与方解石的晶体结构不同，并且更容易溶解，这使得文石在海洋碳酸盐循环中起着重要的作用，

值得更多的关注。

“我们对文石的了解不多，但是我们能够预估它在浅水区，也就是海蝴蝶生活的地方的分布程度。”Sulpis 补充道，“我们能够确认它们的壳会下沉并到达深海。但当我们从深海沉积物中回收样品芯时，发现了大量的方解石，却没有找到我们期望看到的文石。那么，它们去了哪里？”

对文石“失踪”的一种可能的解释是，更易溶解的文石壳在海底比方解石溶解得更快，这个过程会释放出碱性物质使海水的碳酸钙饱和度升高，从而保护方解石不被溶解。如果海洋酸化减缓了文石壳的产生，并因此减缓了文石溶解的“电镀”效应，那么方解石在海底的溶解必须中和更多的二氧化碳。这一理论似乎是合理的，但由于研究海洋文石循环的挑战使其很难被证明。

## » 关于文石循环的知识盲区

在解释人类对文石的循环知之甚少时，Sulpis 表示：“如果你去查阅已发表的文献，会发现一些研究预估文石占海洋中所有碳酸钙总量的 10%，但也会发现另外一些研究表明它占 90%！”

人类对文石循环的认知参差不齐，其根源在于很难在

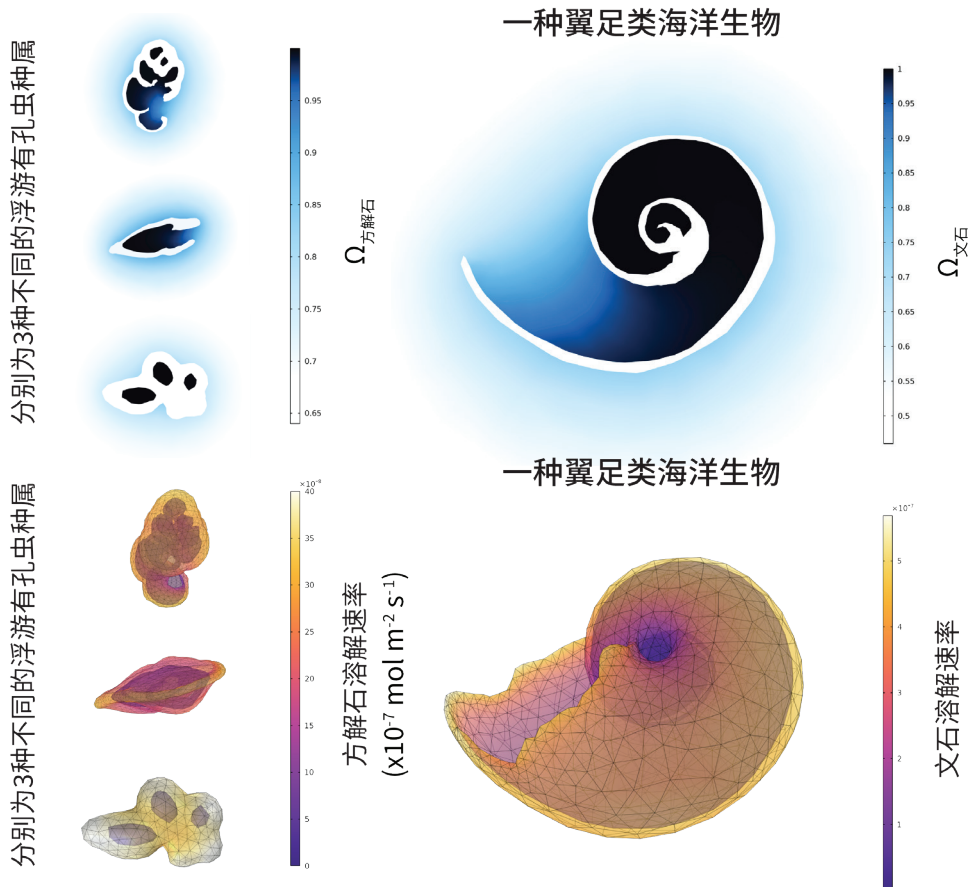


图 3 4 种贝壳的仿真图，显示了它们浸没海水 1 分钟后的变化。突出显示的 *H. inflatus* 贝壳是由文石制成的，其他则由方解石制成。用蓝色图例表示的模拟显示了周围海水中的碳酸钙饱和度水平（上），用热成像仪图例表示的模拟显示了贝壳的溶解速度（下）。

拟海洋生物和环境的边界移动，还能模拟文石和方解石颗粒与周围海水之间发生的溶解反应。在模型中，他们将水的碱度、密度和化学成分设定为典型的深海条件。团队对各种实体进行了建模，并模拟了它们与海水和海底沉积物之间的相互作用。Sulpis 还在沉积物 - 水界面中加入了基于实体标本扫描的贝壳模型。例如，图 3 中突出显示的 *H. inflatus* 翼足类壳，是基于委内瑞拉海岸的 Cariaco 盆地的 CT 扫描标本建立的。借助这种三维图像，仿真能够捕获到贝壳的不规则形状如何影响其溶解。

仿真结果表明，壳的内部结构可能不会对它与海水的反应产生显著影响。“如果你查看最上面一排图，就会发现被困在贝壳内部的水可以被碳酸钙完全饱和。这阻止了壳沿着复杂的内表面发生进一步的溶解，因此壳是从外向内溶解的。”Sulpis 解释说。这表明，对贝壳的模型结构进行一些简化并不一定会影响模拟结果，至少在贝壳完全被海水包围时是这样。

那么，当翼足类动物的外壳和海水被添加到富含方解石的沉积物中时，会发生什么？图 4 展示了这种相互作用的模拟结果。一个溶解的海蝴蝶壳被证明可以阻止混入沉积物中的方解石颗粒溶

海洋深处开展研究。Sulpis 说道：“在这种尺度和深度下，观察海水中的反应几乎是不可能的，因为它们发生在我们无法亲自到达的环境。”从深海沉积物中物理提取脆弱的标本也是一种挑战。“用沉积物捕获器回收海蝴蝶壳真的很困难，”Sulpis 解释说，“当你把它们从深海中带上来时，它们很可能已经溶解了。因此，我们缺乏在深海压力和温度下碳酸钙反应的良好数据。”

之前的研究中曾经有人

尝试过对碳酸钙在海水中的行为进行数值模拟，但这些都对 Sulpis 的研究帮助有限。“大多数的模型把所有的碳酸钙当作方解石，而不是构建单独的文石模型。此外，现有的成岩‘连续介质’模型并没有模拟出在单个颗粒尺度上或在贝壳的单个孔隙中发生的反应。”Sulpis 解释说。

另一个问题是，较早的模型将碳酸钙颗粒描绘成光滑、均匀的物体，这并不准确。“这些晶体颗粒的内外具有复杂的、各向异性的微米尺度形

状。”Sulpis 认同需要对这些颗粒做一些必要的简化，但仍表示，“我们想尽可能地在最小的尺度上保留真实的几何结构。在决定简化一些结构之前，我们需要确认这些简化不会影响模拟结果。”

### » 深入海洋 - 沉积物分界带的模拟

为了更深入地了解方解石和文石在海底的相互作用，Sulpis 使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发了一个新的三维模型。借助这个模型，研究人员不仅能够模

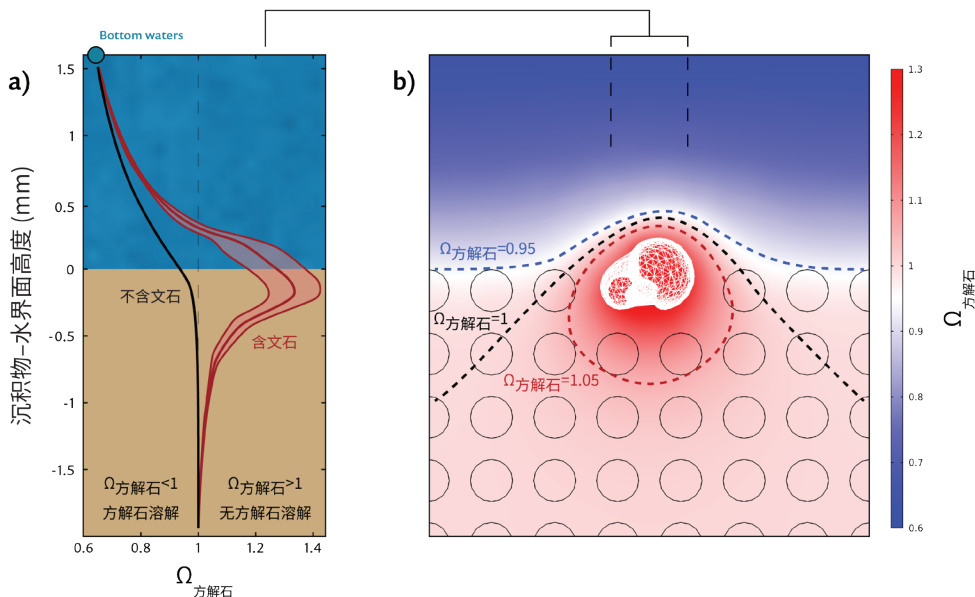


图 4 沉积物 - 水界面的上方、下方的方解石溶解的趋势 (a)。溶解的翼足类动物外壳影响了沉积物 - 水界面周围的边界区域 (b)。

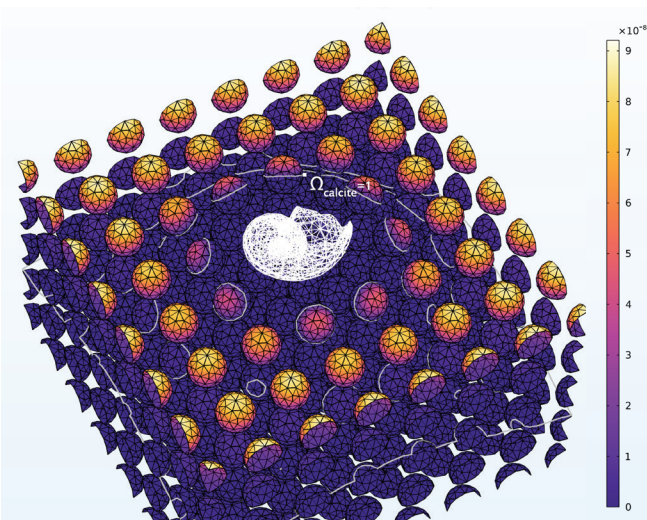


图 5 仿真结果显示了海底沉积物中翼足类动物的存在如何影响附近方解石颗粒的溶解率。颜色较浅的区域表示溶解速度较快的地方。白色线表示饱和线，或称等值线，即方解石与它的溶解副产物处于平衡状态，这表示不应该有任何净溶解或沉淀。

解。Sulpis 根据图 3 的模拟结果对这些颗粒做了简化，将它们描绘为球体。

与沉积物 - 水界面附近的固体混合在一起的海水在这个过程中起着关键作用。但是在真实环境中，海底与海水之间的边界是变化的，海水在固体周围循环，甚至低于明显的分界线。能够捕获海水和沉积物之间逐渐变化的边界是 Sulpis 的三维模型的一个优势。随着翼足类动物外壳的溶解，周围的海水变

为文石饱和态。图 4b 中的红色阴影代表与沉积物混合的饱和海水区。正是这种文石饱和态海水与其他生物遗留的方解石发生了化学作用，并保护着它们。

图 4a 显示了海水中方解石的饱和态，也就是方解石在穿过海洋和沉积物之间的过渡区域时被溶解的能力。在距离海底 1.5 mm 处，海水是不饱和的，任何方解石颗粒都应该很容易被溶解。黑色线显示，在没有任何文石源的情况下，方解石应该在沉积物 - 水界面继续溶解。红色线表示翼足类动物外壳的溶解应该会产生过饱和海水，从而阻止悬浮方解石颗粒的溶解。

### 帮助人类修复海洋

在开发了一种分析水下

微米尺度的生化过程的新方法后，Sulpis 现在正在探索他的工作将如何指导进一步的研究。“我们下一步是尝试通过将方解石和翼足类动物外壳放在烧杯中进行实验，来再现这些过程。目前为止，实验结果与模拟结果吻合良好。”他介绍说，“我们现在的目标是利用这些信息更好地解释我们在自然环境中观察到的情况。”为此，Sulpis 和他的同事已经获得了荷兰研究理事会 (Dutch Research Council) 的资助，用于研究文石生产者对环境的影响。

当然，人类活动是对环境影响最大的生物体活动。人类活动造成的酸化威胁着海洋生物在地球各区域之间编织的维持生命的织锦。考虑到这一点，理解碳酸盐循环这一更广阔的项目就显得尤为紧迫。“与我们添加到海洋中的二氧化碳量相比，只有很小一部分被中和了。”Sulpis 说道，“也许碳酸盐循环过程可以做到这一点，但可能需要几千年的时间！”

从更直接的角度来看，Sulpis 渴望人们将他的研究和分析用于保护海蝴蝶的世界——也是我们的世界。“我们的仿真模型都是开放获取的，我们希望其他人也能够利用我们所创造的东西。”他总结说。

Zeugin Bauberatungen, 瑞士

# 协调开放式办公室的声学环境与设计风格

在开放式办公室中,工作场所的谈话声和电话声经常会分散员工的注意力。为了改善工作场所的声学条件,瑞士咨询公司 Zeugin Bauberatungen 模拟了声音如何在不同设计的办公楼中传播,并分析了不同设计对室内声传播效果的影响,以找到最合适的设计方案。

作者 ALAN PETRILLO

像作曲家一样,声学工程师也可以塑造声音对人耳的影响。虽然日常生活中的声音不像交响乐那样动人,但是房间内的声学效应却能对室内的人产生巨大影响。许多现代化的办公室都采用开放式设计,追求工作场所之间的物理隔断最小化。让开放式办公室内的所有交谈都保持安静,既不可能,也没有必要,但是注重工作场所的声学条件设计可以减少他人谈话所带来的干扰。

为了精准调节工作日办公场所的声景组成,瑞士咨询公司 Zeugin Bauberatungen 使用 COMSOL Multiphysics® 软件分析和预测声音如何在推荐的室内设计中传播。通过仿真模型对声学效应进行准确模拟, Zeugin 团队提出了能同时愉悦视觉与听觉的实际改善建议。

**“借助仿真提出的优化方法,既能与建筑师的设计构想相协调,又能改善员工的声学工作环境。”**

—— THOMAS ZEUGIN, ZEUGIN 公司创始人兼总经理

“大型吸音屏障可能会在视觉上使空间变得杂乱无章,这与室内设计的理念相矛盾。” Zeugin 公司的创始人兼总经理 Thomas Zeugin 介绍说,“借助仿真提出的优化方法,既能与建筑师的设计构想相协调,又能改善员工的声学工作环境。”

## » 仿真优化的设计减少声音干扰

经过深思熟虑的室内设计可以显著改善房间内的声音效果。在优化工作场所声学效果的过程中,提高音质实际上涉及到降低语音的清晰度,低沉的杂音比起清晰的谈话声更不容易让人分心。

人类语音声波位于一组特定的频率范围内。在 Zeugin 制作的一份关于建筑声学的案例研究中,他阐释了谈话时声音的基频通常在 100 ~ 250 Hz。当我们说话时,喉咙和嘴巴的某些动作会引起频率的变化,例如辅音的频率范围为 250 Hz ~ 8 kHz。在这些范围内对声波进行修改有助于降低语音的清晰度,从而减少干扰。

图 2 中的表格列出了与语音的清晰度相关的三个指标,以及与整体声学条件相对应的数值范围,从左到右声学条件逐渐变好。Zeugin 团队使用 COMSOL® 软件开发了房间设计的模型,用于预测这些指标以及其他相关指标的数值。

## » 计算声音传播路径和隔声值

Thomas Zeugin 的职业是听觉效果调配师, 考虑到他还是一位训练有素的音乐家, 这就非常合理了。他解释说: “我在伯尔尼的瑞士爵士乐学校获得了吉他音乐学位, 之后与父亲一起创办了一家工程咨询公司。由于我所接受的音乐教育, 我从一开始就对声学以及房间和建筑物的声音优化产生了浓厚的兴趣。”

当然, Thomas 的分析不仅仅基于他敏锐的听觉。“第一步是基于 Eyring 混响时间方程对房间进行粗略的统计声学计算。在获得更详细的室内设计建筑图后, 我们就可以在

COMSOL 中建立三维模型了。” Thomas 介绍道。

“建立好房间模型后, 我们就可以使用射线声学进行计算, 以获得那些重要的室内声学指标。我们还使用了软件附加的声学模块中的声学扩散方程接口,” Thomas 继续介绍, “这使我们能够计算二次声音传播路径和房间隔

断的隔声值。之后, 我们就能模拟这些因素是如何影响整个模拟空间的声学条件了。”

## » 声学环境改善措施的效果比较

上述案例研究为 Zeugin 利用仿真解决实际的设计问题提供了启发。这个项目的主要研究对象是位于瑞士奥斯特蒙迪根市的一栋办公楼, 包括对一个大型开放式房间内的声音传播进行分析。整个空间的最初设计 (图 3) 包括多张共用办公桌、一面宽大的带有窗户的墙、双层地板和带有悬挂式吸音板的混凝土天花板, 其他材料和家具尚未选定。

“我们的仿真结果表明, 如果不采取任何消声措施, 语音产生的低频声波可以不受阻碍地传播到整个房间。” Thomas 介绍说, “仿真计算得到的偏距值表明, 令人分心的语音声级可以传播到距离声源 12 m 远的地方。”根据图 2 的定义, 这些指标和其他指标均表明该房间的声学效果属于差到中等级别。

不过, 房间的声学性能可以通过统筹布置建筑单元得到改善。通过两个具体的设计变更: 在窗户上安装隔音窗帘, 以及在靠近房间中央的位置悬挂两块嵌入钢板的吸音板, 获得了如图 4 所示的改善效果。

隔音窗帘使整个房间的

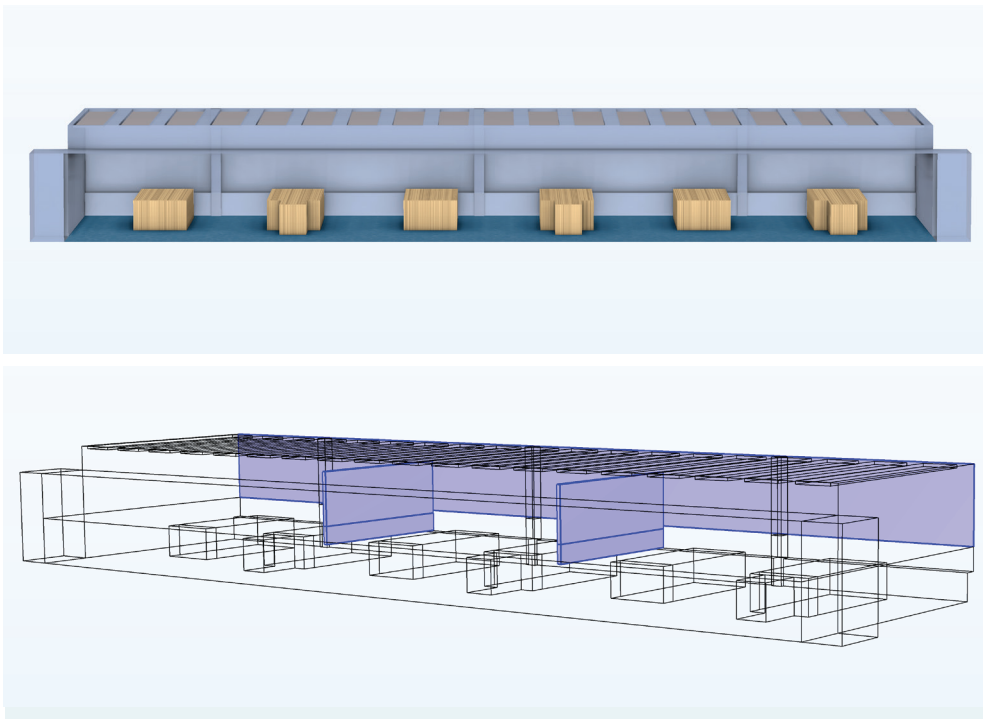


图 1 Zeugin Bauberatungen 使用 COMSOL® 软件模拟的开放式办公室设计。模拟空间包括一个铺着地毯的大型房间内的一组工位 (上图中用棕褐色表示), 悬浮吊顶和整面窗户墙。吸音板和窗帘 (下图) 降低了噪声水平, 改善了声学工作条件。

	差的声学条件	中等声学条件	良好的声学条件
偏距 $r_D$	$r_D > 10 \text{ m}$	$10 \geq r_D > 5 \text{ m}$	$r_D \leq 5 \text{ m}$
空间衰减率 $D_{2,S}$	$D_{2,S} < 5 \text{ dB}$	$5 \text{ dB} \leq D_{2,S} < 7 \text{ dB}$	$D_{2,S} \geq 7 \text{ dB}$
4 m 处语音的 A 加权声压级 $L_{PA,S,4m}$	$L_{PA,S,4m} > 50 \text{ dB(A)}$	$50 \geq L_{PA,S,4m} > 48 \text{ dB(A)}$	$L_{PA,S,4m} \leq 48 \text{ dB(A)}$

图 2 根据左侧栏中的三个指标, 表格中列出了差的、中等和良好的声学条件的数值范围。

来源: EN ISO 3382-3:2012

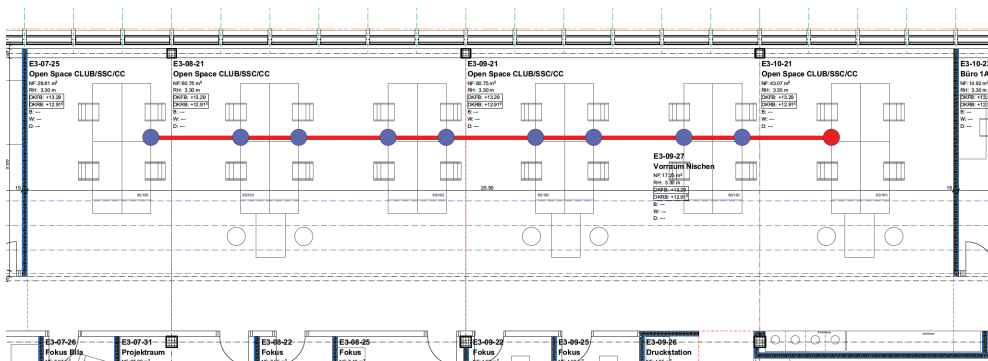


图 3 Zeugin 模拟的办公室设计俯视图。红点表示模拟声波的来源，蓝点表示测量点。

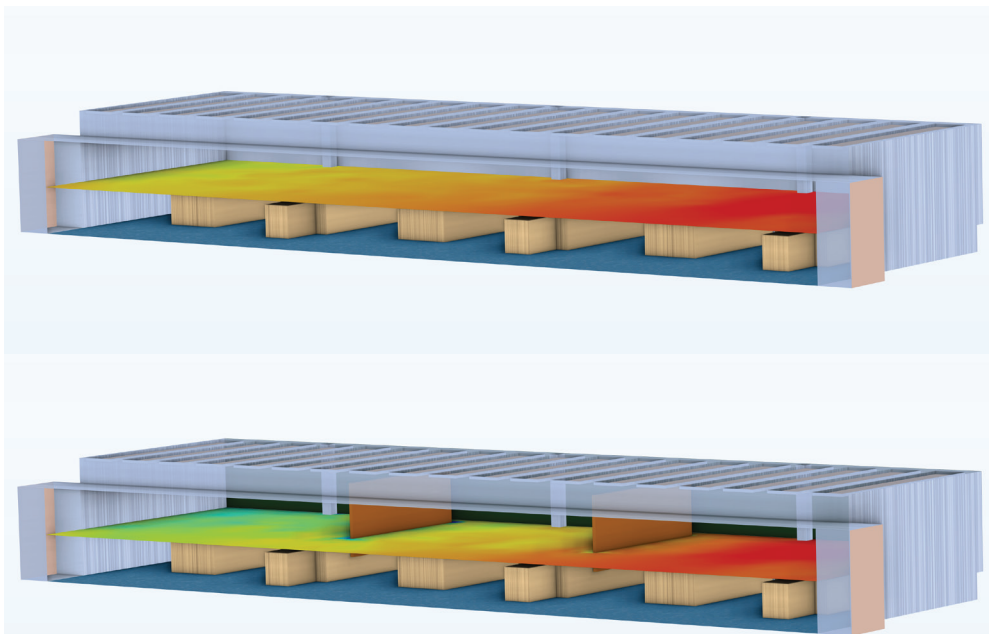


图 4 Zeugin 的模拟结果显示了在未采取任何缓解措施的办公室内 1000 Hz 声场的声压级分布 (上)，以及安装了悬挂式吸音板和隔音窗帘后 1000 Hz 声场分布 (下)。

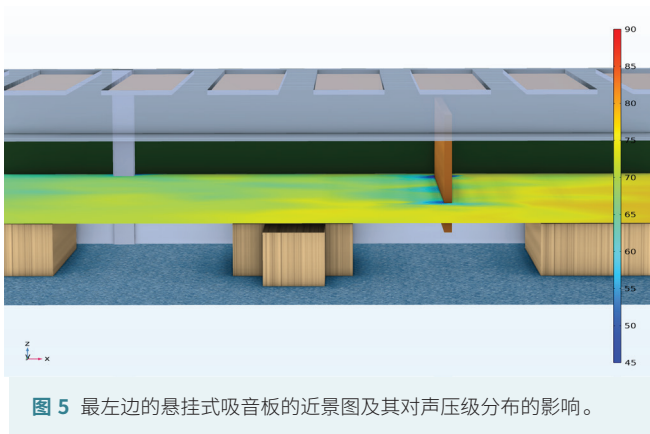


图 5 最左边的悬挂式吸音板的近景图及其对声压级分布的影响。

大面板，而不是围着每个办公桌的隔板。Thomas 继续解释说：“工位之间的隔板可能会给员工带来视觉上的隐私感，但从声学角度来看，这些隔板只能降低 2 ~ 3 dB 的声级。”通过提供基于数值模拟的分析来消除人们对声音的误解，仿真能够帮助指导 Zeugin 的客户选择更有效的室内声学设计。

### » 利用仿真技术创造室内外声景

正如作曲家的作品可以让不同规模的听众产生共鸣一样，Zeugin 团队进行的声学仿真分析的价值也不仅仅是降低独立办公室的噪声。例如，他们目前正在重新设计一家公司的餐厅和会议室，这些场所需要举办聚会，因此对房间内部以及房间与房间之间的声学条件要求很高。还有一些项目是要求在更大的范围内减少噪声。Zeugin 还被伯尔尼市委托改善位于繁忙高速公路旁的整个社区的声学环境。

声学条件进入了“中等”级别范围，而悬挂式吸音板则显著扩大了“良好”级别的声学条件所覆盖的区域。“吸音材料可以起到一定的隔音作用，但使用安装在高处的屏障直接阻断声波路径则最有益。”Thomas 解释道。

请注意，他所说的最有益屏障是指靠近房间中央的

“COMSOL 软件的功能非常强大，并且可以灵活使用，我们可以为许多不同类型的项目开发模型并进行对比计算。”Thomas 总结说，“基于后续的实际测量结果，我们发现仿真结果与实际情况非常吻合。这让我们对自己的研究结果充满信心，也让我们的客户放心。”



COMSOL, 瑞典

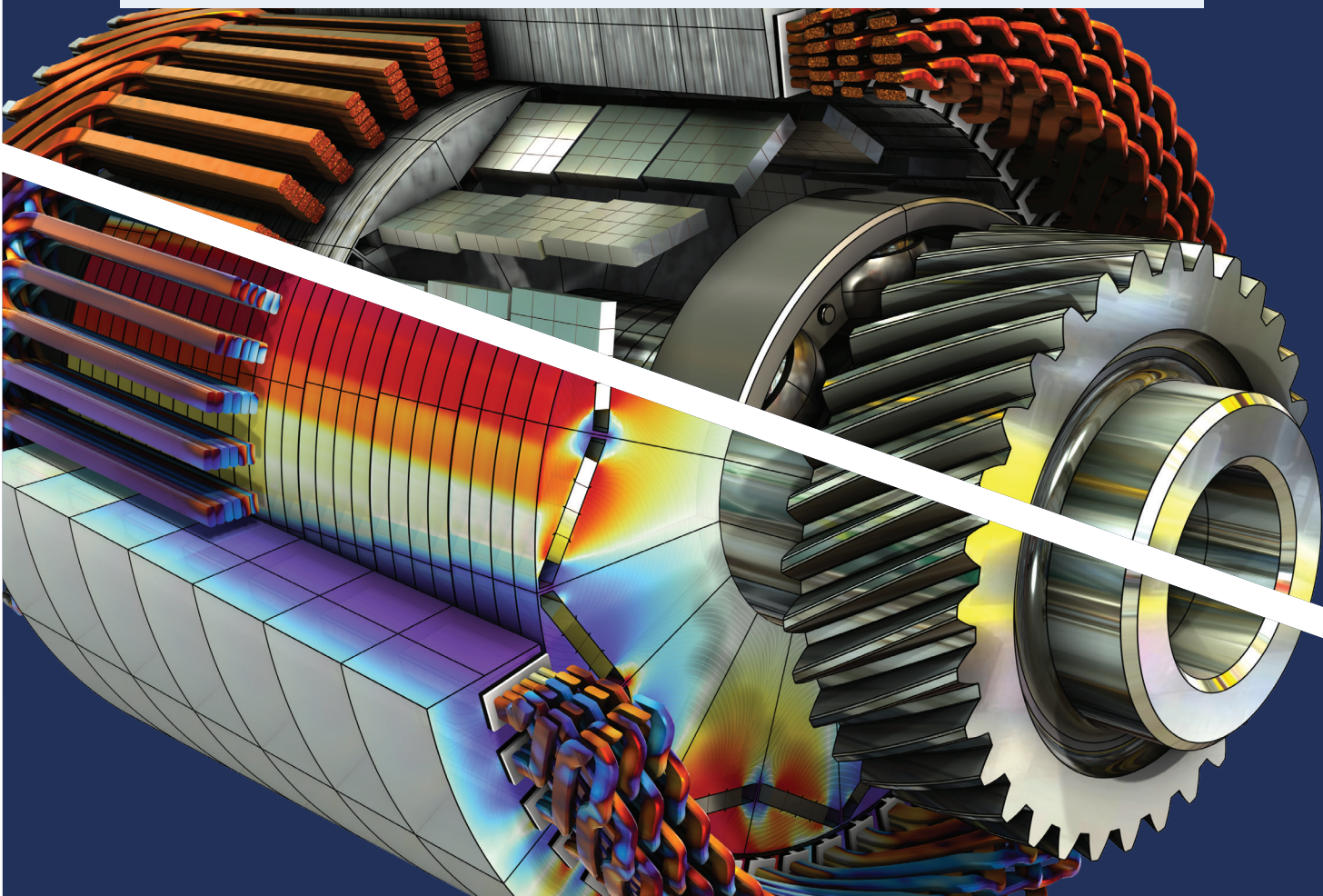
使用三维模拟

# 电机仿真加速汽车电气化

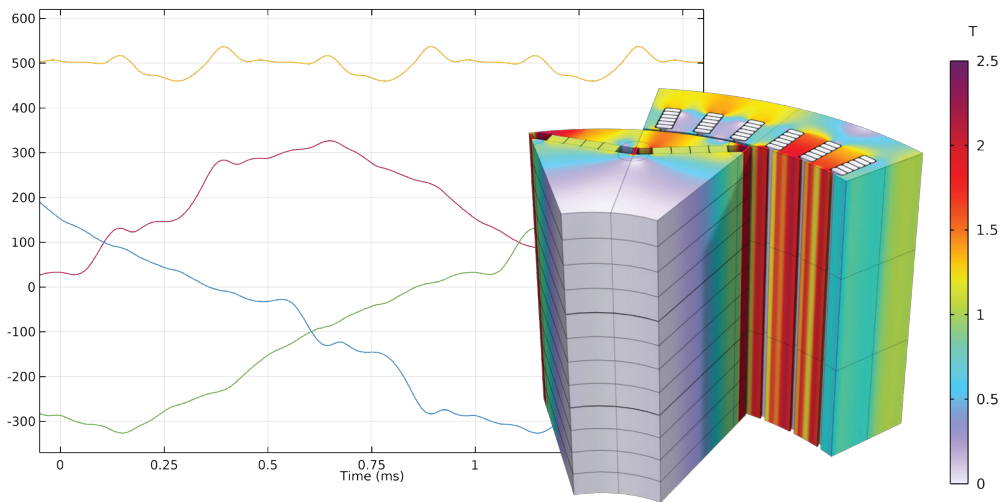
作者 DURK DE VRIES

电机和驱动系统与电动汽车一样，已经有近 200 年的历史。如今，针对不同的市场，有许多不同的电机设计可供选择：有些价格低廉，有些效率高，有些则功率大。然而，随着新一代电动汽车的兴起，对清洁能源解决方案的迫切需求对电机设计提出了新的要求：需要将这三个标准结合在一种设计中。行业和政府利益相关者在电动传动系统的开发上投入了数十亿美元，因此，利用先进的数值仿真技术对电机进行设计势在必行。

世界上并不存在唯一的最佳设计。对于电机设计而言，至少有几种电机类型可以占据行业主导地位，对它们的要求也因具体应用而有所不同，比如是用于货物运输、公共交通，还是赛车运动。为了取得进一步突破，一些企业将不同类型的电机组合在一起，例如 Koenigsegg Automotive AB 公司最近推出了新设计的“磁通”电机。此外，航空航天和航海业也在大力推动电气化解决方案。总之，要实现最优的电机设计，需要探索大量的方案，而 3D 电机仿真将是取得成功的关键。

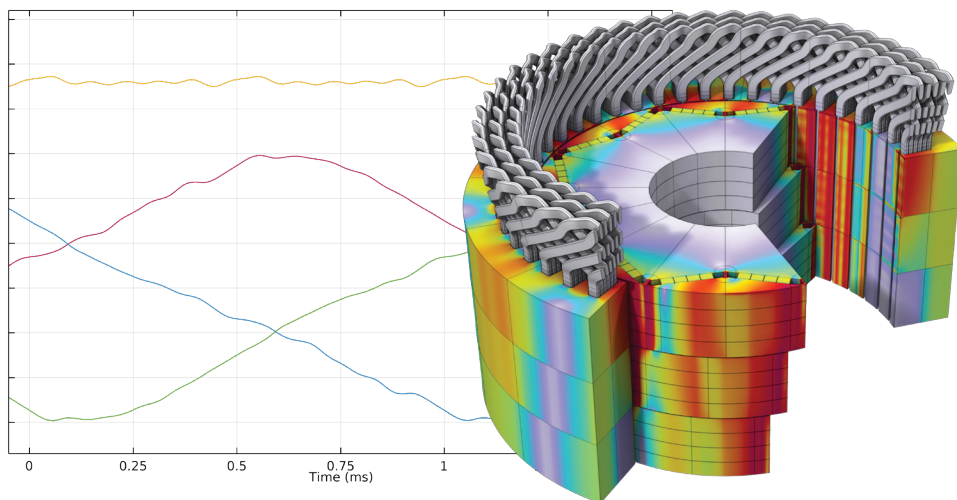


## 不同仿真方法的比较



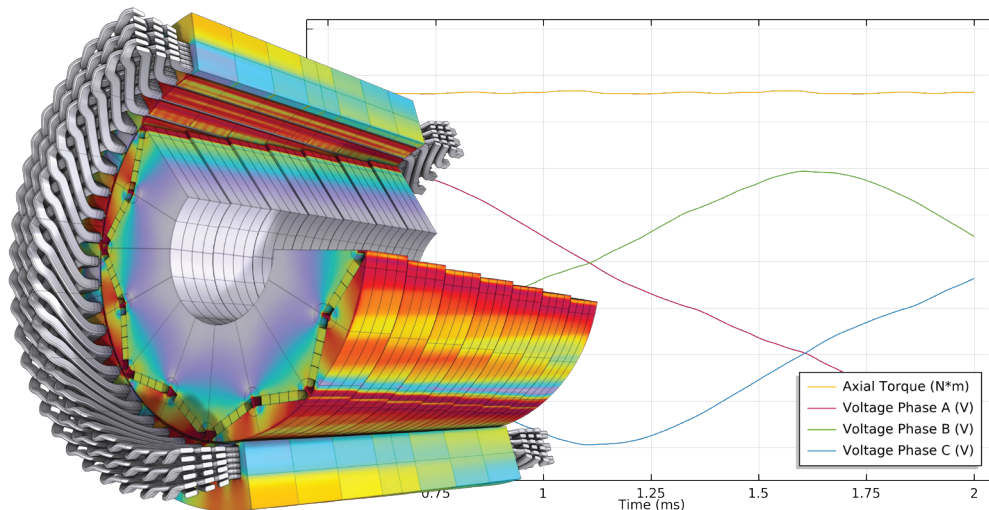
### 拉伸的 2D 模型

这是一种相对简单的 3D 模型，对硬件要求最低，非常接近 2D 模型，可作为研究和验证 3D 仿真的基础。



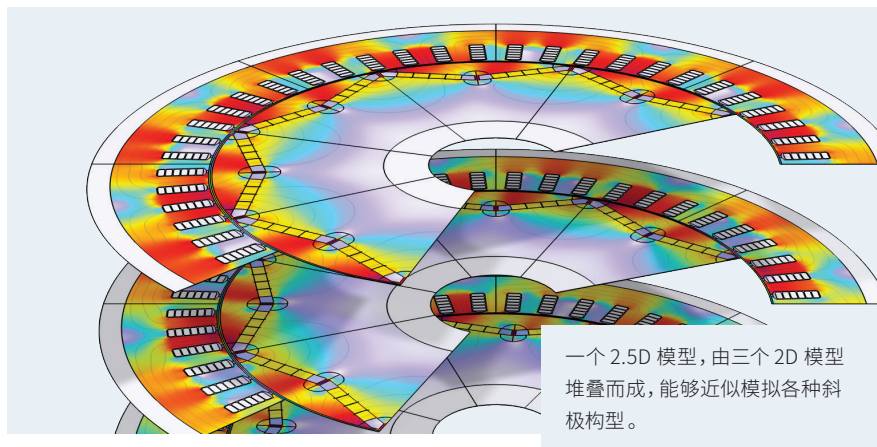
### 3D 对称模型

假设模型绕轴线中点对称，按顺序向前和向后求解，对硬件要求适中，是研究端部效应和一些斜极设计的有效方法。



### 完整的 3D 模型

假设模型仅存在扇形对称，对硬件要求较高，更适合求解复杂的设计，包括转子与定子的斜极设计，以及可能不满足对称性的全耦合多物理场现象。这种模型支持广泛的配置，可用于校准 2D 模型。



## 校准 2D 电机模型

只要调试得当，2D 和 2.5D 电机模型将非常有用，尤其是在进行拓扑优化或参数扫描研究时。许多 3D 效果都可以用 2D 模型来复现或近似。这种模型可用于径向磁通电机，在一定程度上，也可以用于轴向磁通电机。

不过，2D 模型也有一些盲点。传统上，2D 模型必须经过非常昂贵的原型开发周期进行校准和验证。有经验的制造商通常依赖多年来收集的数据，坚持使用熟悉的设计。现在，随着计算机硬件和软件的不断发展，3D 电机模型可以缩小这一差距，从而大大降低成本，加快产品开发。

首要的步骤是建立对 3D 模型的可信度，这可以通过研究一个已知精确解的简单 2D 模型来实现，比如一个仅经过简单拉伸的 3D 模型。这些配置可用于调节 3D 模型的网格和求解器设置，在求解速度和精确度之间找到一个良好的折衷方案。另外一种选择是将模拟结果与测量结果进行比较来验证模型。

完成首要步骤后，就可以将 3D 模型构建成多种形式：包含或不包含斜极、包含或不包含端部绕组、包含或不包含磁体分段切口，等等。对这些不同设置的

模型进行比较，可以分离出确切的效应。下一步是确定 2D 模型能在多大程度上复现 3D 模型。如果不能重现，是否有一些基本逻辑可以增强 2D 模型，以更好地复现 3D 模拟结果，并最终复现测量结果。

当上述这些都实现后，3D 模型将给出我们最值得关注的信息：即使我们并不确切地知道应该使用哪些材料或施加哪些热条件，仍然可以确定哪些输入参数对电机性能有很大影响，哪些可以忽略，或者可以用于节约成本。

最后，必须牢记的是，电机是一种涉及多种物理现象的机械设备。因此，还需要考虑力学、声学 and 热学性能，以实现电机的最佳设计。

## 2D 与 3D 电机仿真对比

一直以来，2D 电机仿真一直占据主导地位，因为只需很少的计算量就能提供足够的精度。然而，近年来，随着电机仿真软件的不断发展，以及日益增强的计算机硬件，对建立高保真 3D 仿真模型的迫切需求，打开了一个全新的市场。

高保真 3D 仿真可以帮助我们深入理解许多难以进行精确量化的物理效应，其中有些效应可以使用 2D 模型复

现，有些可以近似模拟，有些则需要补偿。我们使用 COMSOL Multiphysics® 软件对其中的一些效应进行了研究，包括：

- 边缘效应
- 通过转子斜极、定子斜极或应用凹槽减少转矩脉动
- 分段斜极的转子段间的漏磁
- 磁体中的涡流以及抑制涡流的磁体分段切口效应
- 电阻效应、电感效应和端匝损耗
- 匝内和匝间的集肤效应和邻近效应
- 增加电磁击穿风险的电场奇异性

此外，还需要考虑一些物理现象之间的相互作用，例如与传热、结构力学、声学 and 流体动力学有关的效应。

向 3D 电机仿真的迈进似乎势在必行，但不应将其视为一种单独的解决方案。实际上，最优的开发策略是将 2D 仿真、3D 仿真和原型制作结合起来。对于像拓扑优化这样对计算要求较高的研究，通常仍然先使用经过大量细微调节的 2D 模型进行计算，然后再使用 3D 模型进行模拟。对于这种情况，3D 模型填补了 2D 模型和物理原型之间的缺失：它能让设计人员更深入地理解电机的运行原理，帮助他们更好地解释测量结果并校准 2D 模型。最重要的是，它可以帮助设计人员做出更好的选择。

## 3D 电机仿真资源

近年来，COMSOL Multiphysics 的电机仿真功能经过不断扩展，带来了更优的性能和更广泛的适用性，相关的案例模型也更加完善。您可以通过 [www.comsol.com/model/110261](http://www.comsol.com/model/110261) 免费获取有关 3D 电机仿真的详细资料。🕒

# COMSOL 学习中心

[comsol.com/support/learning-center](https://comsol.com/support/learning-center)

学习中心是一个学习多物理场仿真技术的资源库。所有资源均免费开放，适用于不同水平的仿真人员，您可以按照您的需求进行学习。学习中心通过文章、教程视频、模型文件、仿真练习以及建模操作说明文档等不同的形式，为您提供结构化的软件学习体验。

学习中心的各种学习资源涉及不同的主题和领域：

- 电磁
- 结构力学
- 声学
- 流体流动
- 传热
- 化学工程
- 仿真工作流程
- 接口工具
- 基于方程建模
- 优化
- 仿真 App

## 推荐资源

## 使用 COMSOL Multiphysics® 开启您的仿真之旅

学习中心涵盖了学习使用 COMSOL® 软件的基础资源，包括详细的建模操作说明文档、案例模型及练习文件，能够帮助用户逐步建立基本的仿真技能，熟悉建模工作流程，学习高效的仿真技术，以及学习如何基于模型开发仿真 App。



The screenshot displays the COMSOL Learning Center interface. At the top, there is a navigation bar with links for PRODUCTS, VIDEOS, EVENTS, BLOG, LEARNING CENTER, and SUPPORT. Below this, the page title is "Learning Center" and the current course is "How to Navigate the COMSOL Multiphysics® User Interface". A breadcrumb trail shows "BACK TO LEARNING CENTER". The main content area features an article titled "How to Select Geometry" with a video player showing a 3D model of a mechanical part. The article text explains that there are many points during the model building process where selections are needed and provides a list of methods for selecting geometry. A "Course Parts" sidebar on the right lists various tutorial videos, including "Introduction to the COMSOL Desktop", "Using the Graphics Window", "How to Select Geometry", "Basic Geometry Selections", "Personalize the COMSOL Desktop", "Searching Models, Data, and Autocompleting Expressions", "Learning to Use General-Purpose, Time-Saving Features", "Utilizing Keyboard Shortcuts", and "Accessing Help Resources Within COMSOL Multiphysics®".