

# COMSOL NEWS

多物理场仿真杂志

## 超高速竞赛

从瑞士到美国加州  
多物理场仿真帮助学生晋级决赛

P 14

# 在超高速发展中赢得竞争

当下社会,无论是学生团队参与商业赛事,还是职场中人希望不断提升自身竞争力的动力驱使,想要在竞争激烈的环境中保持领先地位,多物理场仿真技术都可以助其一臂之力,使他们脱颖而出。

未来的产品将以各种不可预见的方式改变我们的生活,然而很少有想法或产品能够通过个人的一己之力实现。在设计产品时,合作与团队精神是关键。在本期的《COMSOL News》中,您会发现从在校学生到专业人士,无一不是通过协同合作来实现目标。在设计工作过程中,既需要在团队内部进行及时沟通,也需要与客户探讨下一步工作计划。因此,具有较强团队合作意识的年轻工程师在进入职场后更容易在竞争中胜出。具备工作所需的专业知识和技术能确保工程师胜任工作,而拥有良好的沟通技巧则是确保工程师能与他人合作开展工作的基础。

本期杂志将向读者介绍团队合作在各种多物理场项目中发挥的作用,从ABB公司的电磁流量计,Viiega公司的辐射采暖降温系统,到为仿真铺平道路的仿真App,无一不体现团队协作的重要性。封面图片是关于EPFL的学生如何通过仿真设计超级高铁,以及他们在该多学科项目中积极展开合作,对流体、电气、力学和材料科学等各种现象进行深入研究的故事。

我们很高兴能够通过本期杂志向您展示来自COMSOL用户的宝贵经验和见解。

祝您阅读愉快!



Natalia Switala  
COMSOL



扫描上图二维码  
关注COMSOL微信

## 参与 COMSOL 社区互动

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

用户论坛 [cn.comsol.com/forum](http://cn.comsol.com/forum)

微信 COMSOL-China

微博 COMSOL 中国

我们期待您对本刊的意见和建议;欢迎通过 [info.cn@comsol.com](mailto:info.cn@comsol.com) 与我们联系。

# COMSOL NEWS

© 2019 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)。

# 目录

## 辐射采暖和降温

### 4 | 看不到的奇迹: 采暖、降温和融雪



## 仿真 App 应用

### 7 | 仿真 App 让更多人受益于仿真工作

## 数字孪生

### 10 | ABB 公司借助数字孪生模型提升电磁流量计的性能

## 超级高铁设计

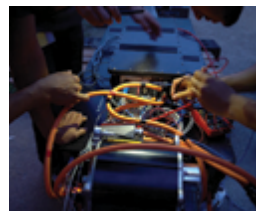
### 14 | 仿真助力年轻工程师设计面向未来的产品

## 光学天线设计

### 16 | 利用遗传算法优化超表面拓扑结构

## 建筑物热管理

### 19 | 用仿真营造舒适家居



## 封面图片

EPFL 的学生们正在为超级高铁客舱的电力电缆铺设线路。图片来源:EPFL

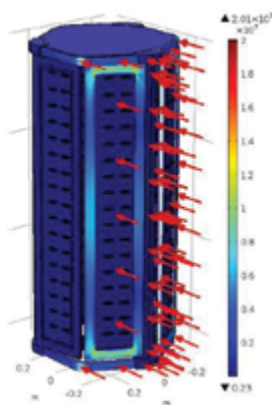
# 专题文章

## 仿真的教学应用

22 | 药学专业开设定量系统药理学课程

## 地震工程分析

24 | 利用数值仿真对大坝进行地震安全评估



## 智慧城市

27 | 多物理场仿真推动智慧城市发展

## 电池设计

30 | 通过数值仿真抑制电池内的枝晶生长

## 半导体器件热管理

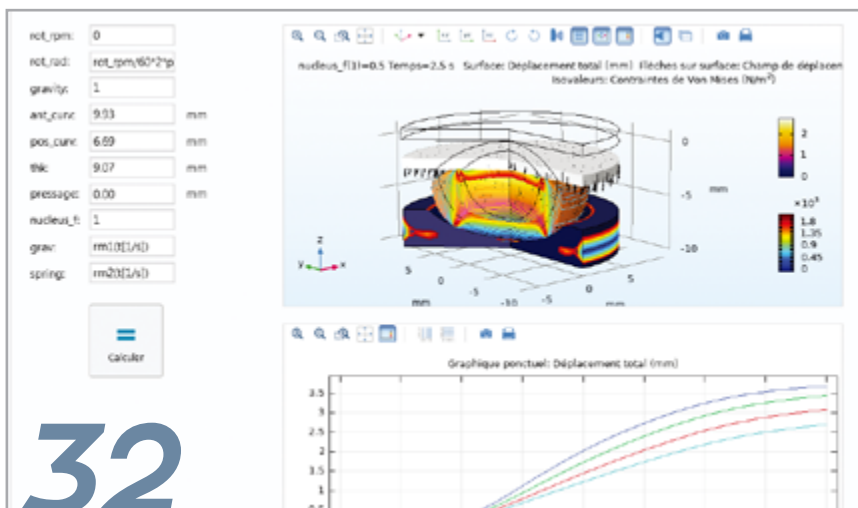
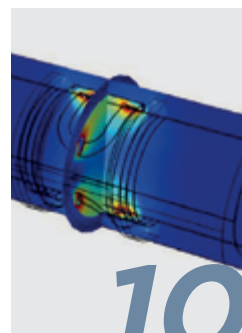
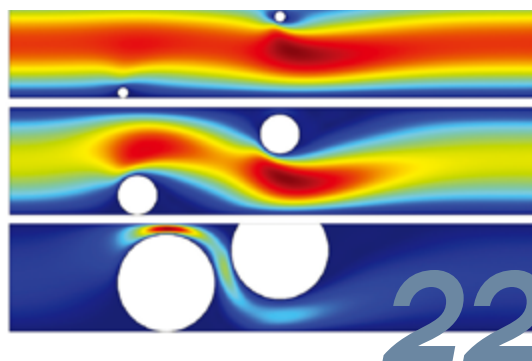
32 | 新型半导体功率器件的热管理

## 建筑工程应用

34 | 多物理场仿真技术提升建筑效率和安全

## 特约评论

36 | 合作是个性化医疗的关键



# 看不到的奇迹: 采暖、降温和融雪

Viega 公司使用仿真 App 与客户分享有限元仿真结果, 在设计住宅和商业项目的辐射采暖和降温系统时, 为客户提供宝贵的工程支持。

作者 **NICOLAS HUC**

紧急救援人员每天都要与时间展开竞争: 救援过程必须争分夺秒, 他们在驾驶救护车或紧急救援直升机时, 可能会出现惊慌、紧张的情绪, 导致肾上腺素激增, 行动仓促。想象一下应急救援人员可能遇到的一种情形: 他们在严冬时节到达救援现场, 却发现直升机着陆区被冰雪覆盖。时间如此紧迫, 能否将这个区域的冰雪迅速铲除? 应急车辆在冰上打滑怎么办? 在这类极端条件下开展救援工作, 风险会非常高, 冒险展开救援是否值得?

幸运的是有一种技术可以避免此类问题的发生, 而且其应用正变得越来越广泛, 这就是液体循环加热融雪系统。地面(通常是混凝土)中埋有管道, 温水可以通过管道在整个需要融雪的区域中循环。考虑到紧急救援情况, 工程师可以通过适当的设计, 使融雪系统起到防止冰雪堆积、减少人工清理的作用。

根据具体的应用场景, 这种辐射地板系统有不同的作用, 可以用于采暖或者降温等不同用途。系统采用的管道设计都是类似的: 地板下方铺设管道, 调节管道中水的流量和温度, 就可以控制空间的温度和舒适度(图 2)。

Viega 公司是一家设计和制造辐射采暖系统的公司, 擅长帮助客户解决那些需要特殊温度控制的情况。



图 1. 装有 Viega 公司融雪系统的停机坪上的紧急救援直升机机库。

## ⇒ 辐射地板系统

早在罗马帝国时代, 辐射系统就已经出现, 并且具有多种存在形式。如今研究人员发现, 辐射系统也可以在现代社会的商业建筑和住宅中大显身手。辐射加热不仅可以用于加热地板, 还可以控制房间的温度。地板保持温暖的温度时, 会向房间内释放热辐射。这种辐射只会被不透明的表面吸收, 换句话说, 它会被我们的身体(而不是空气)吸收, 从而让我们感觉到温暖。

Viega 公司的工程师们设计了一种特定的管道铺设结构, 然后将管道按照设计铺设到地板下面。热水(如果用来冷却, 则为冷水)穿过管道并对周围的材料进行加热, 热量最终通过地板表面热辐射到房间的其他位置。这就像我们从树荫下走到阳光下, 虽然空气温度相同, 但由于身体在阳光下能够吸收热辐射, 因此会感觉更温暖。管道由交联高密度聚核乙烯(通常称为

PEX) 制成。交联聚乙烯具有两种优势: 不仅能够承受更高的温度和压力, 而且不易因形变而破裂。这些管道都经过了严苛的检验, 在符合温度和压力等级的标准下, 设计人员可以将弯曲半径和管壁厚度尽量降到最小。

在建筑设计的最前沿领域, 环境意识和能源效率近年来颇受关注, 这极大地促进了辐射采暖的应用。辐射采暖系统可以与现代化高效锅炉配合使用。由于辐射系统不使用空气循环, 而且使用比普通采暖系统更低的水温(-45 °C vs. -82 °C), 因此具有更高的能量利用率。仅仅需要开关阀门, 就可以轻松控制管道中的水温, 甚至可以在整个房间内产生更恒定的温度。

## ⇒ 系统设计

Brett Austin 是 Viega 公司加热和制冷设计部主管, 他使用

COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件来设计系统, 以满足客户的需求。“COMSOL 多物理场仿真软件让我们能够开展加热和制冷的设计, 并选择管道的排布方式。” Austin 说, “我们根据地板平面结构绘制管道排布方案, 然后导入 COMSOL 多物理场仿真软件中, 并实现与客户的共享。仿真工作能够提供工程数据来支持我们的设计。”当研发团队拿到一个项目时, 机械工程师会到现场明确各方面的要求, 包括加热和制冷输出结果、建筑结构、地板材料以及可接受的水温等。随后团队使用仿真来确定管道的铺设位置、间距, 以及地板的温度分布情况(图 3), 以确保满足客户的需求。Austin 补充说: “对于具有多向输出或结构复杂的非标准应用设计, COMSOL 多物理场仿真软件尤其有用。”

多物理场仿真技术使 Viega 公司受益颇多。研究人员使用仿真 App 和 COMSOL Server™ 产品, 可以与客户共享仿真结果。当团队人员与客户会面时, 他们可以快速调整参数, 如水温或管道直径, 并在现场显示加热或冷却系统的使用效果。Austin 解释道: “客户经常会针对最初提出的问题多次修改方案, 仿真 App 使我们能够跨越这些问题, 直接为客户提供宝贵的可视化服务。它是一个很棒的工具, 我们可以将结果共享给世界任何地方的客户。”

### ⇒ 阿纳海姆地区交通联运中心

在南加州这样的环境中, 温度低一点会让人感觉更舒适。这就是阿纳海姆地区交通联运中心(ARTIC, 图 4)的工作人员来到 Viega 公司, 并希望安装辐射地板(降温)系统的原因。由于建筑物规模庞

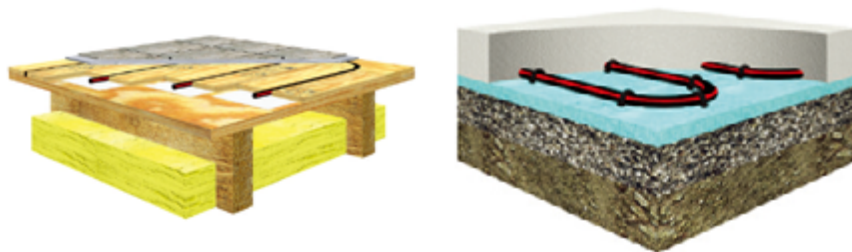


图 2. 环境面板中的辐射管(左); 混凝土中的辐射管(右)。

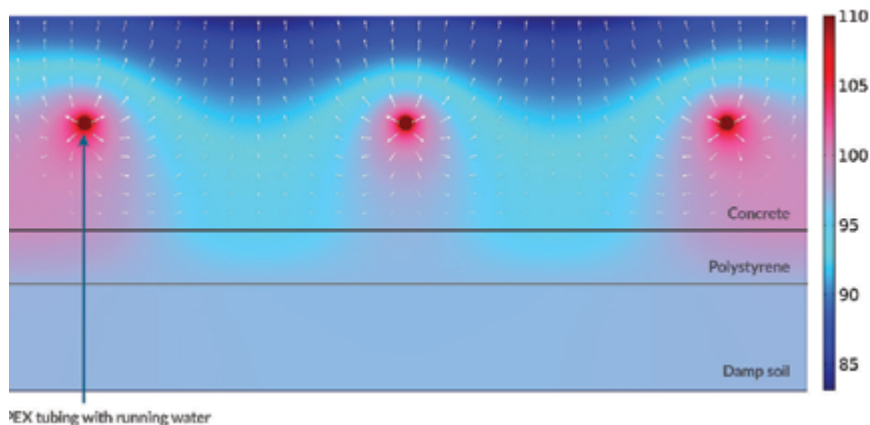


图 3. 辐射加热系统的横截面温度分布。箭头指示了热通量的传导方向, 表示传递到地板上表面以及地板上的空气中的热量比率。温度单位为 °F。图注: Concrete - 混凝土; Polystyrene - 聚苯乙烯; Damp soil - 潮湿土壤; PEX tubing with running water - 用于水循环的 PEX 管道

大, 使用空气循环冷却系统几乎不可能实现期望的效果, 而且维持系统运行需要的高昂费用更是令人望而却步。Austin 的团队承担了这项任务。他们先对一块较小的地板区域进行建模, 然后再将结果推广到整个建筑。然而, Austin 认为这种仿真方式会增加一些额外的困难, 建筑物吸收的热量与制冷输出必须达到非常好的平衡。由于建筑物的圆顶装有大量的窗户(图 5), 有利于吸收太阳能, 为建筑物增加了大量的热能, 因此冷却能力必须非常高才能抵消这些热量。ARTIC 的工程师还遇到另一项挑战, 管道中的水温必须低于通常的冷却系统中的水温 (-10°C vs. -14°C)。但是, 由于某些区域的管道间距很小, 使得该区域的温度接近地板表面的露点温度, 可能会造成地板表面水汽凝结, 从而给客户造

成一定的困扰。Viega 的研究团队希望能够避免出现这样的情况。

借助 COMSOL 多物理场仿真软件, 团队找到了防止出现冷凝的方案: 在管道周围安装一层薄薄的绝热层。“我们与现场工程师一起制定了一个解决方案, 在供应管顶部添加一层绝热材料, 缓解了系统产生的低温影响,” Austin 说, “这听起来似乎违反直觉。但在这一案例中, 由于施工限制, 某些区域的管道距离非常近, 这样做可以防止这些区域发生冷凝。”在此基础上, 他们还使用 COMSOL 多物理场仿真软件进行了瞬态仿真, 用来研发一种制冷控制方案: 用整晚的时间冷却地板上的板坯并使其保持低温。在夜间, 冷冻水在管道内流动, 冷却混凝土。到了早晨, 水流被关闭, 地板仍然能够在一天中保持凉爽。这种方案



图 4. 阿纳海姆地区交通联运中心 (ARTIC)。

有助于减少必要的制冷能耗。研究人员利用仿真来确认地板的低温状态能持续多长时间, 以及这种策略是否可行。

#### ⇒ 太阳谷滑雪度假村

作为保证紧急入口和直升机升降坪安全的关键因素, 融雪系统不仅可以在紧急救援方面大显身手, 还可以应用到另一个完全不同的领域: 奢侈生活享受。高端滑雪场极其重视客户的舒适度, 复杂且可靠的融雪系统对他们的体验至关重要。装有融雪系统的地面会保持温暖的温度, 不断地将冰雪融化。

当爱达荷州凯彻姆的太阳谷滑雪场的工作人员来到 Viega 公司时, Austin 才知道他们即将面临的任务是多么艰巨。客户希望在整个度假村安装一个辐射融雪系统, 覆盖超过 60,000 平方英尺 (约合 6600 平方米) 的步行区和车道。为了利用仿真来处理这样一个大型项目, Austin 和他的团队必须对系统的各个部分进行模拟。“幸运的是, 大部分仿真工作使用的面板模型都是相似的”他解释道, “我们使用内部程序将不同部分绘制成 CAD 格式, 然后选取其中一小片, 指定辐射面板材料属性



图 5. ARTIC 在铺设地板之前先安装了辐射冷却系统(上); ARTIC 内部地面的最终外观(下)。

和水温, 然后运行仿真计算。”团队人员利用仿真 App 直观地将结果展现给滑雪场的工作人员。仿真 App 在这项工作的完成过程中发挥了重要作用。

借助 Viega 公司的设计和安装, 太阳谷滑雪场获益匪浅。滑雪场内的所有道路和高人流量区域都安装了融雪系统(图 6)。铲除这些区域的雪有时并不可行, 因此需要另一种除雪方法。融雪系统可以最大限度地减少清理、降低维护, 并且由于融雪过程不需要加入盐或化学品, 因此有助于保



图 6. 爱达荷州太阳谷滑雪场铺设的管道。

持滑雪场的专业形象。最重要的是, 由于“无冰”区域的存在, 滑雪场变得更安全, 不利因素也得以减少。

#### ⇒ 使用 COMSOL Server™

COMSOL Server™ 为 Viega 公司提供了一个强大的解决方案, 使销售团队可以将公司的服务内容直观地展示给客户。“COMSOL 多物理场仿真软件为我们的工作提供了很多额外的价值, 销售团队也可以使用有限元模拟的结果。” Austin 说, “这种展示方式非常直观, 软件也很容易使用。我们计划在未来使用更多耦合物理场接口来增强建模能力。” ❖



Viega 公司的研究团队。从左到右: Liam Collins, 辐射设计助理工程师; Travis Simoneau, 辐射设计助理工程师; Josef Marcum, 辐射设计工程师; Brett Austin, 加热和制冷设计部主管

# 仿真 APP 让更多人 受益于仿真工作

通过建立仿真 App 并将其共享给其他协作者, 工程师、同事和客户都可参与到建模工作中, 很多公司和机构都因此受益。

作者 **THOMAS FORRISTER**

仿真软件是一个非常强大的工具。它可以在制作原型机之前, 利用计算机研究产品中的物理现象, 并预测其工作状态, 因此能够帮助用户节省大量的研发时间和资金。然而, 计算机建模这一工作通常会由仿真专业人员来完成, 这样就限制了公司内的研发资源及研发成果。虽然其他的团队成员可能并不是仿真方面的专业人员, 但他们对产品的研发、设计和制造流程有着宝贵的见解。因此, 让他们参与到仿真工作中也是十分有必要的。

与一代代更新产品原型的产品开发模式相比, 将多物理场仿真应用到产品开发中并扩大其使用范围的开发模式, 能够帮助企业更快地、以更低成本将更高质量的产品推向市场。通过创建和分发仿真 App, 使仿真工作变得简单, 非专业人员也可以参与到仿真工作中, 从而打破组织内的障碍, 为合作沟通、结果预测、产品创新和优化提供更多拓展空间。

通过创建和分发仿真 App, Veryst Engineering、AltaSim Technologies 和 GLL Bio-Med Analytics 这三家公司的客户设计工作流程变得更加高效。

## ⇒ 轻松完成仿真 App 开发和分发

借助仿真 App, 任何人都可以在没有仿真专业人员的帮助下进行参数测试, 即使是没有工程背景的客户或同事, 也可以

满怀信心地做出快速、明智的决策。这样也使得团队的协同工作更加有效。

简单介绍一下从模型到仿真 App 的工作流程: 仿真专家先在 COMSOL® 多物理场仿真软件中创建模型, 然后使用软件中的 App 开发器将模型转换为仿真 App。在 App 开发器的界面上进行简单的拖拽操作, 数分钟内就可以完成仿真 App 的创建, 得到一个具有参数输入和输出功能的定制化界面, 使最终用户仅需关注与其工作相关的模型参数。

“仿真 App 的开发过程非常简



图 1. 用户可以通过 COMSOL Server™ 访问仿真 App, 并在网页浏览器或客户端上运行它们。

单, 对用户也十分友好。”来自 Veryst Engineering 公司的 Nagi Elabbasi 说。Veryst 公司是一家专业提供仿真技术咨询的企业。同时, 他介绍道, 仿真 App 具有很多功能, 而对于 Veryst 公司来说, 这些仿真 App 也是一种很好的营销工具。Elabbasi 解释说: “在仿真 App 中, 有大量的 Java® 功能可供使用。”这意味着

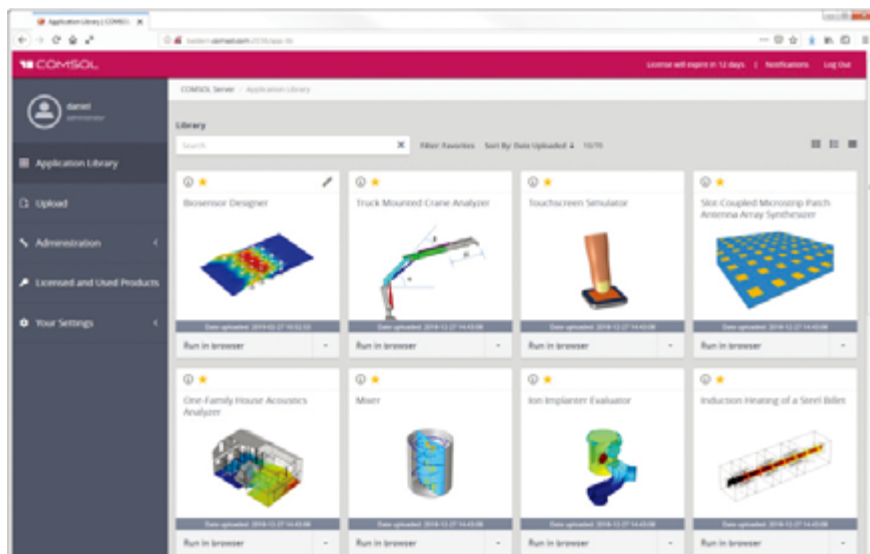


图 2. COMSOL Server™ 可以用来管理 App 及其使用情况。

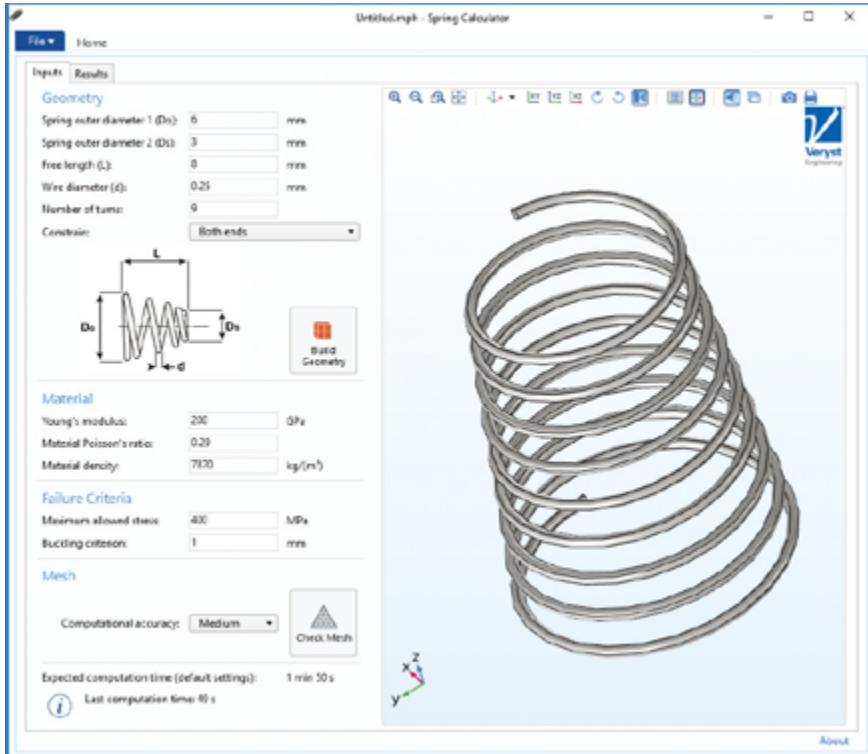


图 3. 弹簧计算器 App。图片由 Veryst Engineering 公司提供。

### ⇒ 将仿真 App 作为解决方案

顾问们会以何种方式使用仿真 App，通常取决于他们面对的客户需求。例如，GLL 公司向客户介绍了没有物理背景的人如何利用仿真 App 开展分析工作，收到了客户的积极反馈。GLL 公司的 Gary Long 说：“当客户意识到他们可以开展自己的仿真工作并能够得到结果时，他们的头脑中就会灵光乍现，点燃各种想法。”

有时客户在使用模型后才能意识到仿真 App 为他们开启了很多的可能。根据 Veryst 公司的经验，客户将“意识到模型为什么对他们有用，然后希望在公司内部使用，最终他们会看到仿真 App 是如何帮助他们开启各种可能性的。” Elabbasi 说。他还补充到，越多人具备使用仿真 App 的意识，就能在与客户的合作中越早地引入仿真 App。

而在 AltaSim 公司，顾问们通常会在充分了解客户需求之后，再让仿真 App 发挥作用。AltaSim 公司的 Kyle Koppenhoefer 说：“我们与客户进行了大量的探讨，以了解他们正在寻找的是什么。如果能找到一些关键参数，我们会建议使用仿真 App。”

Veryst 的研发人员可以将仿真 App 与公司的材料库 PolyUMod 软件相链接，从而为客户提供更高级的应用开发。

仿真 App 的创建者可以通过两种方法将仿真 App 共享给合作者来使用：编译成独立的可执行文件，或通过 App 管理工具将仿真 App 分发给合作者。正如软件名称所标识的那样，COMSOL

Compiler™ 用于创建编译的仿真 App，生成的程序可在无 COMSOL 多物理场仿真软件许可证的 Windows®、Linux® 或 macOS 系统上运行。如果仿真 App 的创建者想要上传、管理 App，并允许其他用户通过网页浏览器或客户端运行仿真 App，则通常会选择 COMSOL Server™ (图 1-图 2) 来完成这些目标。

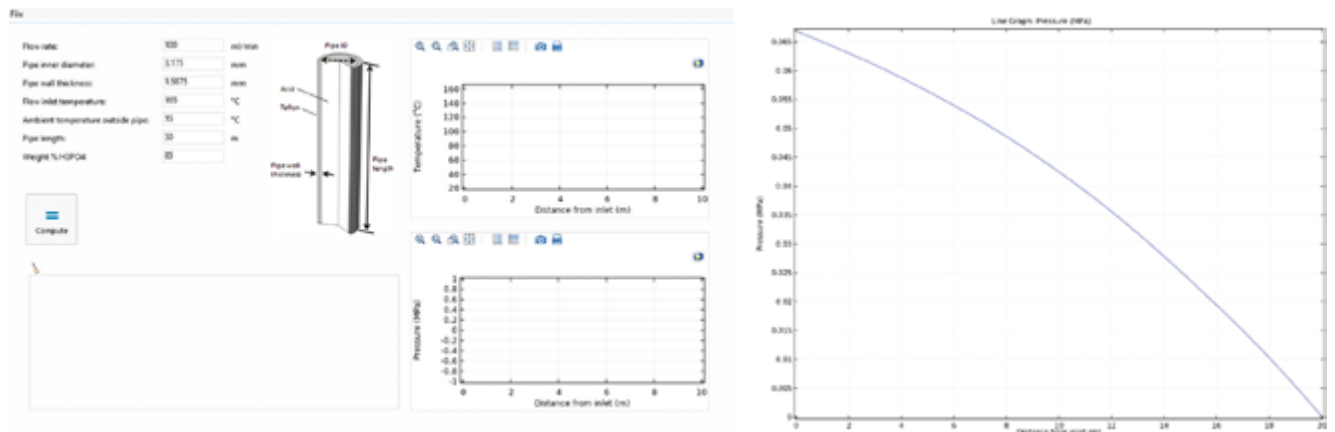


图 4. 为便于使用，创建仿真 App 时可以包含有限的输入参数(左)和输出结果(右)。图片由 AltaSim Technologies 公司提供。



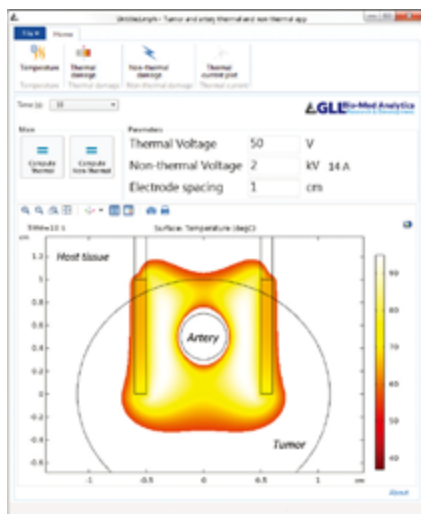


图 5. 一个 App 可包含两种仿真: GLL 公司的 Gary Long 创建的热性肿瘤和非热性肿瘤的消融 App。图片由 GLL 公司提供。

## ⇒ 构建专业仿真 App 以满足客户的各种需求

即使是最复杂的模型,也可以转换为易于使用的仿真 App。Veryst 公司的客户使用仿真 App 对设计变化进行模拟,并开展参数研究和灵敏度分析。“这样一来,客户不需要关心仿真设置,只需要专注于能够改善产品品质的核心技术就可以了。”Elabbasi 说。还有一些 Veryst 的客户只是将仿真 App 用作交互式模型阅读器,以三维形式展示模型结果,包括模型在旋转时不同横截面或不同时间的结果等(图 3)。这有助于他们更好地理解模型的结果。

通过将仿真 App 共享给其他团队,组织内部的仿真专家能够专注于更高级的建模项目。Koppenhoefer 表示,仿真 App 可以让现场工程师更好地了解他们的设计是如何运作的,从而能够更好地做出设计决策。

AltaSim 公司则利用仿真 App 帮助客户减少更改方案的次数。例如,由于温度和流速等一些因素存在变化,要准确预测设备的真实情况是十分困难的,这导致

**“客户将意识到模型为什么对他们有用,然后希望在公司内部使用,最终他们会看到仿真 App 是如何帮助他们开启各种可能性的。”**

— NAGI ELABBASI, VERYST ENGINEERING

设计方案必须不断地反复更改,使用仿真 App 则可以大大减少修改次数。来自不同专业的工程师可以根据自己的需要,利用仿真 App 不断展开测试,直到满意为止,这无疑提高了生产效率和收入(图 4)。

GLL 公司的许多客户都是医疗设备领域的初创公司,因此经常会开展特有实验。GLL 公司对这些实验进行仿真,向客户证明建模的准确性。“让客户看到仿真结果并将它们与实验结果进行比较,是一项非常有说服力的工作”Long 解释说。在此基础上,他们利用经过验证的模型创建仿真 App,使得仿真工程师、App 用户和其他团队成员(通常是医生)能够通过相同的界面,看到实时可视化仿真结果。

GLL 公司创建了一个医疗设备仿真 App(图 5),用来模拟热性肿瘤和非热性

肿瘤的消融情况。在仿真 App 的帮助下,工程师设计了这样一款设备:它不仅能消融癌细胞,还可将消融区域可视化,甚至可以导入特定组织结构的 MRI 和 CT 扫描结果。仿真 App 的用户界面包含一系列菜单,便于用户轻松选择要研究的内容。例如,由于温度和热坏死区域与时间相关,因此用户可以指定一个时间,查看在这一点上由于热量或温度造成的坏死情况(图 6)。仿真 App 中包含三个输入参数:热电压、非热电压和电极间距。其中电流图可以通过实验电流获得,因此用户可以轻松地验证仿真结果。

## ⇒ 合作促进创新

正如以上三位仿真专业人员所言,越来越多的人开始使用仿真 App。COMSOL 多物理场仿真软件中的 App 开发器使得创建仿真 App 成为一项十分简单的工作,短短几分钟即可完成 App 创建。COMSOL Server 和 COMSOL Compiler 则帮助开发者将仿真 App 共享给大家。参与仿真工作的门槛变低了,仿真专家、研究人员、工程师和客户可以共同合作,完成产品的研发和创新。❖

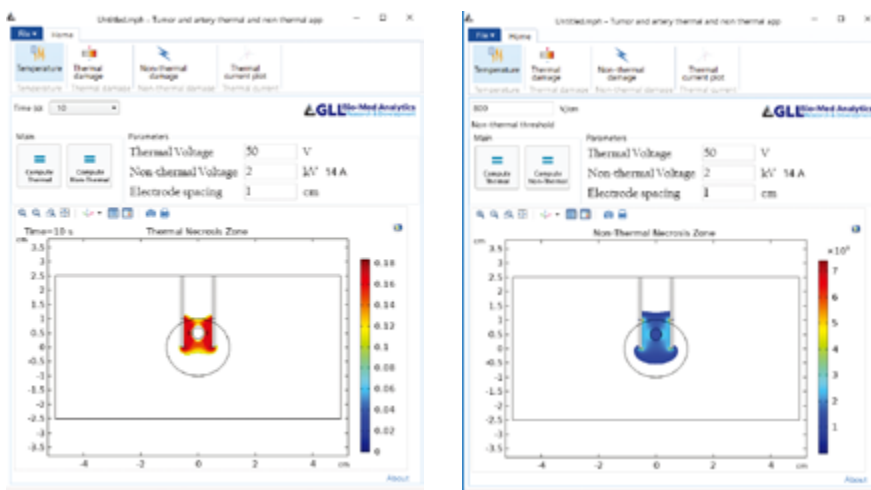


图 6. 一款可供用户研究热性肿瘤和非热性肿瘤坏死区域的医疗设备仿真 App。图片由 GLL 公司提供。

# ABB 公司借助数字孪生模型提升电磁流量计的性能

ABB 公司的流量测量产品反映了流量传感技术的最新发展动态, 他们借助新型的数字孪生工具实现了在虚拟环境中模拟真实的流量计, 从而能够预测电磁流量计的性能。这个以多物理场建模为基础的数字孪生工具实现了流量计设计的改进和在实际工况下的性能预测。

作者 **SUBHASHISH DASGUPTA** , **VINAY KARIWALA**

在过去的 10 年里, 新技术和数字化浪潮已经对液体相关的传统制造行业(如水和废水的运输和处理)产生了显著的影响。随着这些新兴的技术变得越来越实用并被人们广泛接受, ABB 公司的研究团队开始致力于为客户提供高性能、低成本的工具, 以帮助用户增强他们的竞争优势。数字孪生技术可以通过尽早检测物理问题并准确预测结果来实现这一目标。展望未来, ABB 正努力抓住机遇, 通过应用数字孪生技术改进流量计产品, 以应对各种工艺挑战。他们正以前所未有的速度迈向价值经营, 超越客户不断增长的期望。

## ⇒ 电磁流量计

要在整个生产过程中达到高性能标准, 离不开可靠精确的仪器。40 多年来, ABB 公司一直致力于产品开发, 提供系统解决方案和服务, 已经成为全球水行业的可靠合作伙伴。ABB 公司生产的电磁流量计精确耐用, 以其卓越的性能成为工业生产过程中的重要工具(图 1A)。

电磁流量计在 ABB 的流量测量产品

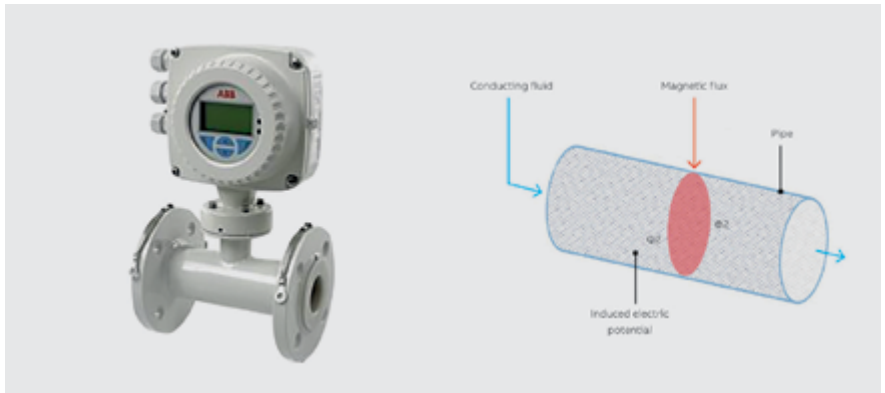


图 1. (A) ABB 公司的电磁流量计; (B) 磁通量与运动导电液体的相互作用产生的感应电势 ( $\Phi_1$ ) 与流体速度成正比  $\Phi_1 - \Phi_2$ 。图注: Conducting fluid - 导电液体; Magnetic flux - 磁通量; Included electric potential - 感应电势; Pipe - 管道

组合中占有重要的份额, 具有安装简单、几乎不产生压降、测量精度高等一系列独特的优势, 吸引着众多从事运输或处理导电液体的客户。不仅如此, 电磁流量计的性能不易受到温度、压力或密度变化的影响, 也不受微小的流量波动的影响, 并且其测量与流体流动方向无关。在宽流量范围内, 测量误差可以控制在  $\pm 0.2\%$  以内, 能够在低流速下进行精确测量。

为了在控制成本的同时满足产品性能

的高标准, ABB 公司不断探索能够改进电磁流量计产品性能的各种方法。该公司将长期积累的流量计物理知识与新的建模技术相结合, 不断努力提升现有流量计的性能和价值。

电磁流量计是通过法拉第电磁感应原理来确定液体的流速。当导电液体(如水)流经的管道内有磁场存在时, 管道横截面上会产生感应电势或电动势(图 1B)。电动势与流量或流速成比例, 通过测量感应电

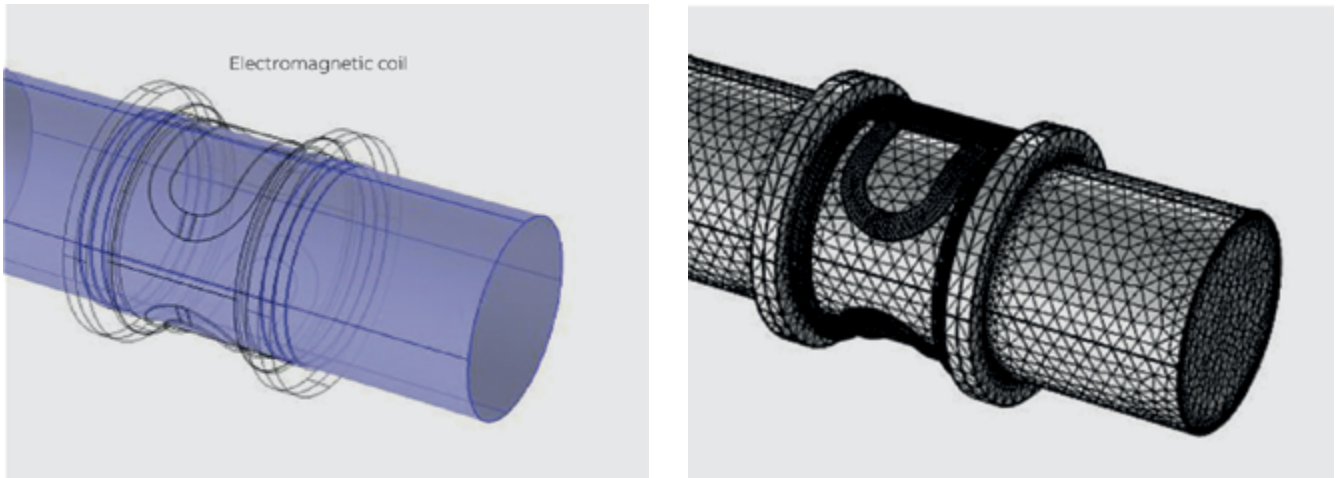


图 2. (A) 使用 CAD 软件构建的电磁流量计几何模型; (B) 用于有限元分析计算的离散化几何结构。

动势, 就可以估计流量。感应电动势与流体速度的比值为灵敏度, 这一属性与校准系数有关。预测灵敏度非常重要, 然而预测由条件变化引起的灵敏度变化同样关键。我们必须从产品安全的角度评估可能影响流量计工作的热和结构特性, 并评估流量计在恶劣条件下的表现。

### ⇒ 数字孪生概念

如果我们可以根据物理过程的相关理论知识开发出一款模型, 用来预测流量计的性能, 能够最大程度地降低测试需求, 将会怎样呢? 这样的结果意味着生产力和产品性能的大幅提升。ABB 开发了一款基于多物理场有限元分析技术的电磁流量计

软件模型来实现这一目标。这个模型也称为数字孪生模型, 可以在虚拟世界中呈现与现实世界中一模一样的物体。研究人员可以借此模拟一个物体在现实世界中的真实行为, 并基于由此获得的过程知识来理解性能的复杂性, 检测潜在问题, 进而改进设计方案。通过仿真获取的这些信息还可以用于构建实际的产品。数字孪生模型几乎可以在虚拟世界中模拟任何工况, 能够真实可靠地反映现实世界中发生的实际情况。

### ⇒ 多物理场模型

在有限元分析建模中, 对象的几何结构会离散成相对较小的有限空间。计算模

型提供了材料属性、工作条件和边界条件等信息, 然后通过在有限域上求解基于物理场的方程得到相关参数。通过使用这种方法, 研究人员可以得到三维信息和所需的时变信息, 并据此对石油、天然气和航空等行业的设备进行性能预测和设计改进。与传统测试方法相比, 使用有限元建模方法可以轻松理解复杂的过程。实验室测试方法因其依赖于设备中使用的传感器

“ABB 公司开发了一款基于多物理场有限元分析技术的电磁流量计软件模型来实现这一目标。”

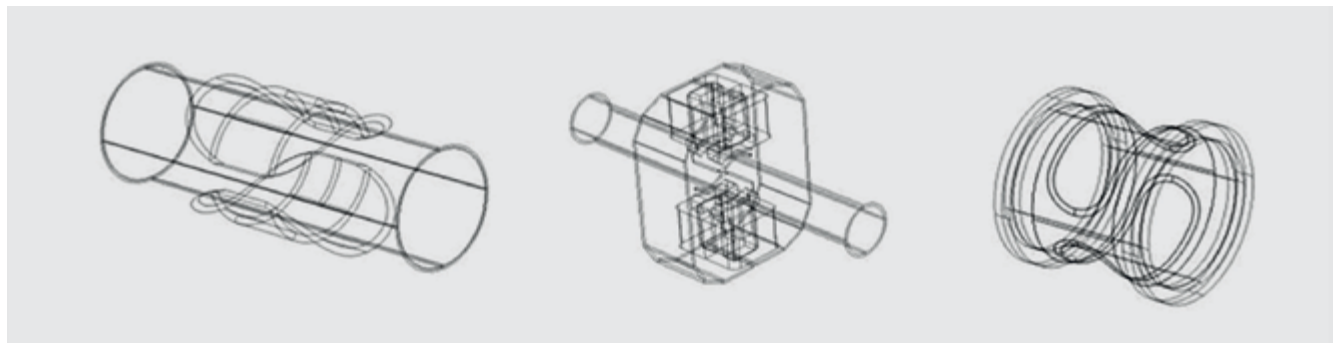


图 2. (C) 具有不同部件设计和/或尺寸的多流量计模型。

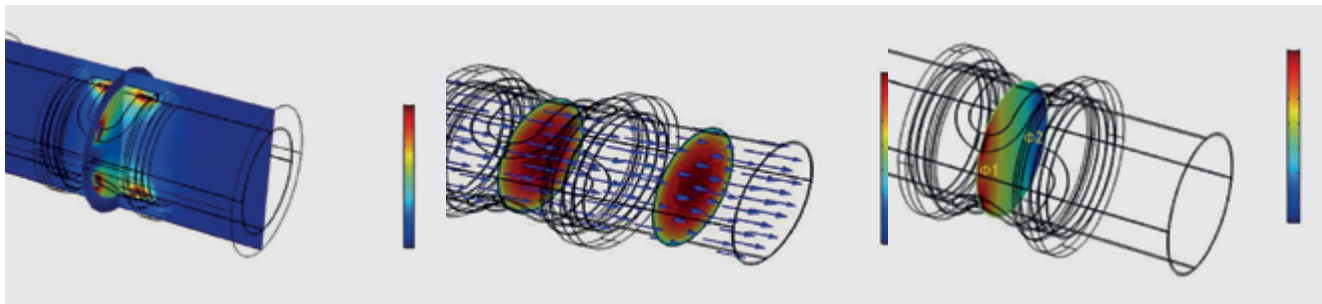


图 3. 相关物理现象的定性评估, 红色表示最大值。(A) 磁通分布; (B) 等流速线; (C) 电势。

的数量和位置而受到限制, 这种方法不仅成本高昂, 而且难以实现过程工业应用。相比之下, 高性能计算持续取得新的进展, 并且成本不断降低, 使用有限元分析可以轻松对基于物理场的各种复杂方程进行迭代求解。

ABB 选择了电磁流量计多物理场模型来改进其原本已经非常卓越的流量计产品。

### ⇒ 多种物理现象的耦合

研究人员最初使用 CAD 软件构建了电磁流量计的几何模型 (图 2A)。然后将

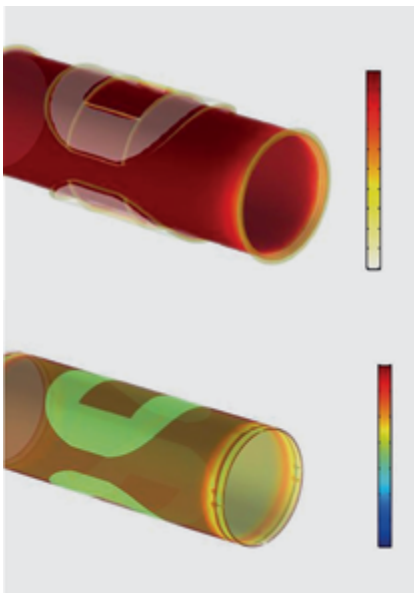


图 4. 热应力场和水力应力场的定性分析, 红色表示最大值。(A) 温度场; (B) 应力场。

几何结构 (或称计算域) 离散化为极小单元, 并在此基础上求解方程 (图 2B)。他们建立了多种不同设计和尺寸的流量计样品模型 (图 2C)。

将两个主要现象 (电磁学和流体动力学) 以及其他各种物理现象耦合到单个模型中是一项极具挑战的工作。研究人员通过求解麦克斯韦方程来分析电磁学问题。

这些方程初步计算了计算域内的磁通密度 (图 3A)。

通过求解各种流动条件下的质量和动量守恒方程来分析管道内的流体流动 (图 3B)。接着, 使用从法拉第电磁感应定律推导出的洛伦兹方程对磁场和流场进行积分, 从而计算磁通量与流体速度相互作用所产生的感应电动势 (图 3C)。模型的主要输出结果是灵敏度 (即感应电动势与流体速度的比值)。为了得到全面的分析结果, 研究人员还使用该模型求解了热传

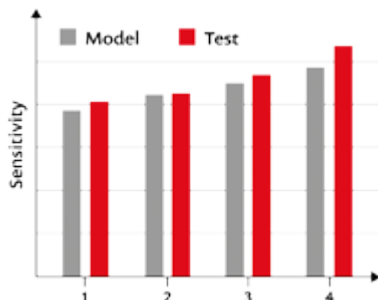


图 5. 研究人员对多种不同的流量计进行建模, 并将模型输出结果与测试数据进行比较。

导和结构动力学参数, 计算作用在管壁上的热应力和液压应力 (图 4)。这种先进的仿真技术对于预测严苛条件对流量计健康的影响至关重要, 例如高温和/或高压流体通过管道时产生的影响。这些详尽的计算最终带来了一款完善的流量计多物理场模型, 可以用来预测产品性能以及可能出现的故障。

物理测试不仅成本高昂, 而且费时费力, 建模的明显优势在于能够最大程度地减少测试需求。ABB 公司的研究人员在 2017 年就已经成功模拟了几款设计独特、具有不同尺寸的流量计。模型计算的灵敏度与现场测试得到的灵敏度的一致性高达 95% —— 建立真实世界的精确虚拟模型并将其用作预测工具 (图 5)。除了预测灵敏度, 这个模型还可以预测流量计的线性度, 也就是可以预测灵敏度随流量变化的恒定

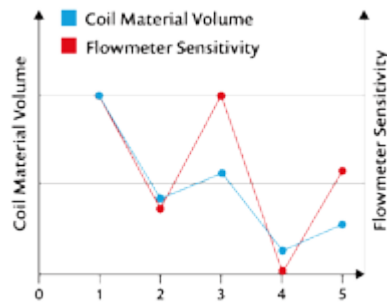


图 6. 为优化线圈设计而执行的迭代建模。图注: Coil Material Volume - 线圈材料体积; Flowmeter Sensitivity - 流量计灵敏度

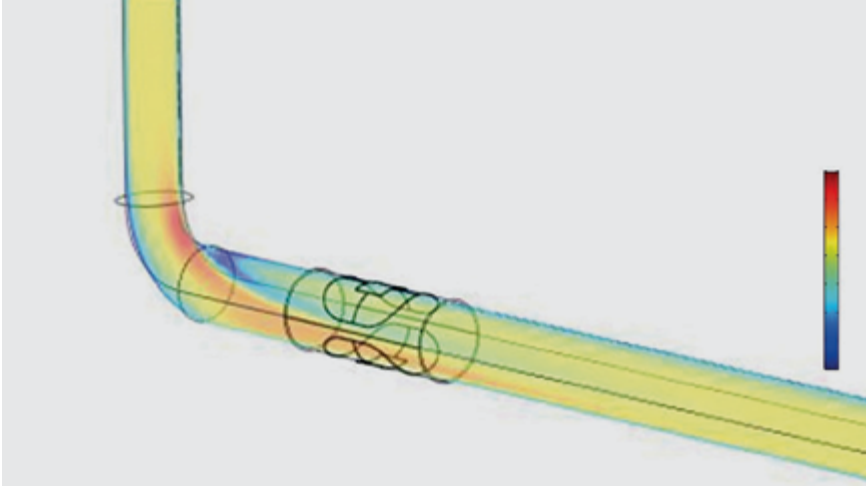


图 7. 通过模拟安装在客户管道系统中的电磁流量计,可以预测流量计在测量被扭曲的流体时的性能。

性(测量精度)。数字孪生概念不仅是测试阶段的一个工具,而且还被广泛用于修改流量计的现有设计,以提高产品质量。通过将新颖的部件设计和创新理念融入模型,可以对流量计性能的改进做出评估。

研究人员发现,改进的流量计比现有的流量计产品性能更加优越,这为以后的设计改进奠定了基础。在流量计开发工作中应用数字孪生模型,可以提升流量计的灵敏度以及测量精度,同时可以降低制造成本。ABB 公司目前正在测试多种流量计原型样机,并结合各种设计修改方案对一些创新想法的可行性进行评估。

## ⇒ 事半功倍

产品开发的主要目标是尽可能提升性能的同时减少材料的使用。借助数字孪生

“数字孪生模型几乎可以在虚拟世界中模拟任何工况,能够真实可靠地反映现实世界中发生的实际情况。”

模型,可以优化流量计的部件设计,降低材料成本。

电磁线圈是流量计中的重要部件,研究人员通过修改线圈,获得了最佳的尺寸和形状,从而使流量计的性能达到最优。他们通过一系列迭代,评估了给定线圈的尺寸变化(图 6);在特定的迭代中,使用明显更少的铜线圈材料可以保持流量计的原始灵敏度。线圈仿真结果表明,新设计在保持原始性能水平的同时,减少了所需的材料用量。由于线圈成本占流量计材料总成本的比重非常大,因此新的设计方案对大型流量计的开发具有特殊的价值。ABB 近期已经针对减少大型流量计的总占用空间提出了解决方案,并已在后续的原型测试阶段对其进行了评估和验证。

## ⇒ 重现现场条件

开发和测试是产品生命周期的重要阶段,安装阶段也同样存在着其特有的挑战,原因是弯管和阀门等系统功能部件可能会使流体在流动时发生扭曲,从而影响测量的准确度。正因如此,了解管道特征对流量计性能的系统影响非常重要。ABB 公司的

研究人员将流量计数字孪生模型进行了扩展,在其中引入了客户管道系统(图 7)。

ABB 公司通过研究流量修正在提高测量精度方面所起的作用,深入了解了上游弯管等系统功能部件的影响。基于这些信息,他们可以确定流量计在给定管道系统内的最佳安装位置,从而能够校正流量计的读数。

目前,该工具在预测流量计性能方面表现出了高度的准确性,使工程师能够改进流量计的设计。扩展后的模型可以模拟流量计的运行对客户管道系统流量分布的影响方式,这也为提高测量精度开辟了新的道路。不仅如此,数字孪生技术还可以用来指导流量计的现场安装,使水管理等行业能够改善流量控制系统,从根本上提高工业过程的性能。

为了给客户提供最先进的数字化手段,帮助他们实现无与伦比的生产力和性能,ABB 公司投入了大量的精力到开发用于其他制造业的数字孪生模型中。他们致力于实现产品价值最大化,追求生产零缺陷的产品,确保最佳运营,将产品快速推向市场,以及改善运营效率。❖



Subhashish Dasgupta,  
印度班加罗尔 ABB 公司  
研究中心研究  
员



Vinay Kariwala,  
印度班加罗尔 ABB 公司  
BU 测量与分析部门技术  
经理

# 仿真助力年轻工程师设计面向未来的产品

EPFLoop 团队受邀参加了由 SpaceX 公司举办的超级高铁设计竞赛, 并成功晋级前三名。该团队利用多物理场仿真技术, 以独特的设计赢得参赛资格并取得优异的成绩。

作者 **BRIANNE CHRISTOPHER**

在 SpaceX 公司一年一度的超级高铁设计竞赛 (Hyperloop Pod Competition) 期间, 受邀的工程团队均致力于设计和构建超级高铁。超级高铁的概念是希望实现一种可以在洲际间穿梭, 超高速、自驱动的交通运输方式。这样的系统不仅会彻底改变人们的出行体验, 还可以为交通出行方式提供更环保的选择。

超级高铁设计竞赛始于 2015 年, 是埃隆·马斯克 (Elon Musk) 提出的一个伟大创意。每年夏天在美国加利福尼亚州洛杉矶市西南部的霍桑市 (Hawthorne) 举行为期一周的比赛。在比赛周期间, 参赛者要在一英里 (约 1.6 公里) 长的轨道 (图 1) 上以大约 500 公里的时速测试他们设计的列车。

## ⇒ 与世界顶级工程师一起工作

在一年一度的超级高铁设计竞赛中, 全球排名前 20 的团队会被邀请到加州的测试中心进行比赛, 前三名的团队将进入决赛, 在真空轨道中进行测试。首次参赛的 EPFLoop 团队表现出众, 作为当年在真空轨道中运行测试的三个团队之一出现在决赛中。令人印象深刻的是, 他们在测试周结束时首先获得了晋级, 并被告知他们的客舱设计表现出了最高的可靠性。遗憾的是, 在比赛最后一天的高速运行中, 由于测试轨道上意外出现的灰尘影响了列车的性能, EPFLoop 团队最终获得了第三名, 但是他们在比赛中获取了宝贵的经验。

EPFLoop 竞赛团队在瑞士洛桑联邦理工学院 (Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL) 成立, 主要成员是工程专业的学生和技术顾问。团队的首席顾问 Mario Paolone 博士评论说, 超级高铁竞赛是一个“让学生和年轻工程师与世界顶级工程师一起参与最新科技挑战的机会”。学生们不仅有机会使用高科测试设备, 与专业工程师近距离交流; 这一经历也是一次绝佳的

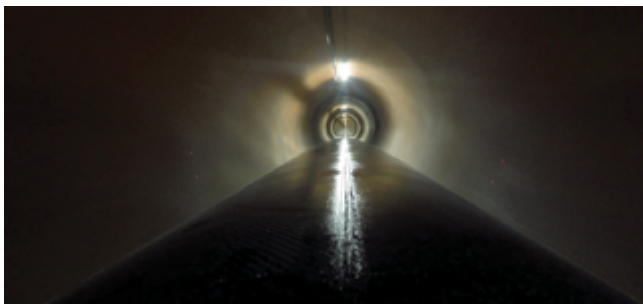


图 1. 超级高铁测试轨道的内部视图。



图 2. EPFLoop 的超级高铁设计。

机会, 让他们能够了解节能交通研究的重要性。不仅如此, 本次竞赛还让学生们对研究感到兴奋, 并激励他们将来投身于工程领域。

## ⇒ 超级高铁仿真

参与 EPFLoop 的学生除了有机会参观 SpaceX 公司并体验先进的测试设备, 他们还有一个重要的收获: 使用多物理场仿真软件解决实际问题的宝贵经验。EPFLoop 的超级高铁设计 (图 2) 的各个方面均涉及建模与仿真。实际上, Paolone 博士称仿真是他们项目的“核心”。其中一个原因是, 该团队使用的 60 米测试轨道与 SpaceX 公司长达一英里的测试轨道相去甚远。因此,

即使他们的测试能够验证低速下的仿真结果, 仍需要依靠仿真软件来深入了解在非常高的速度下会发生什么情况。EPFLoop 技术负责人 Lorenzo Benedetti 博士指出, “列车的每个零部件都必须通过仿真进行验证。”

EPFLoop 团队通过使用 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件, 能够在进入 SpaceX 之前就可以分析超高速管道列车的复杂零部件并预测其性能。在设计过程中, 他们还需要能够同时观察多种物理效应, 包括力学、流体、电气和材料科学现象。Benedetti 评论道: “这个项目是多个学科的融合。”例如, 设计团队想要了解由轻质复合碳纤维制成的

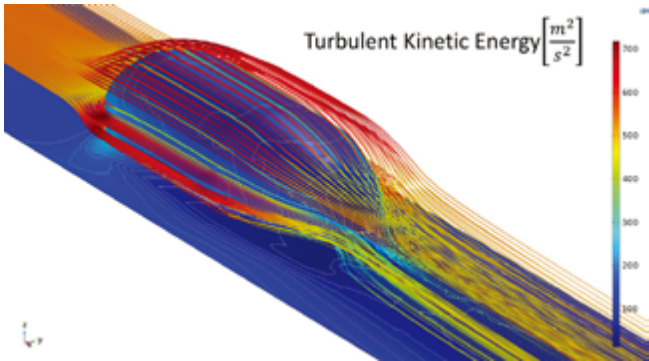


图 3. 超级高铁的复合材料壳体结构周围的湍流动能。  
图注: Turbulent Kinetic Energy - 湍流动能

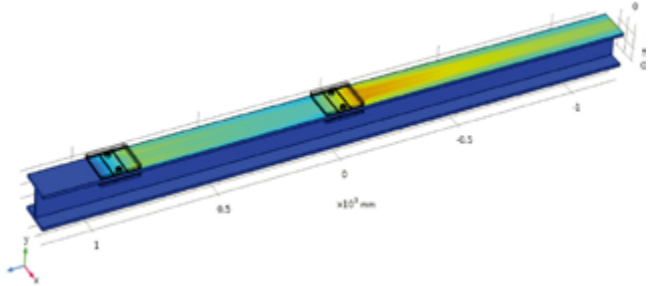


图 4. 超级高铁制动系统的温度分布。

客舱外壳在测试轨道上的性能表现。为了将气动阻力降到最低,他们使用了计算流体动力学(CFD)分析,并在此过程中进行了形状优化和力学研究(图 3)。

列车外壳必须既轻便,又能承受加速和减速时的空气压力。该团队使用 COMSOL 多物理场仿真软件中的“高马赫数流动”接口确定了列车的升力和阻力系数,然后使用软件中的 LiveLink™ for MATLAB® 产品,通过 CFD 分析得到的压力分布对列车的气动外形进行了优化。

除此之外,团队还需要了解在高速行驶时列车的压力舱在真空管中的性能,他们设计了真空罩用来储存电池和舱内的电子元件。事实上,有些电子设备无法在真空条件下使用,不符合标准的设计可能会导致内部组件直接暴露在轨道(其本质上是一个真空管)上而破坏轨道。他们使用 COMSOL 多物理场仿真对由复合材料制成的车体进行了结构分析,以了解各层之间的叠加;通过优化结构响应,最大限度地减轻了重量;并针对优化后的设计研究了客舱的 Tsai-Wu 安全系数和主应力。

⇒ **制动有力,收放自如**

超级高铁的制动系统是多物理场仿真的另一个应用实例。制

动器需要能够在列车达到最高速度后能使其安全减速。然而在真空管中,制动系统内不会产生空气对流散热,热量会大量储存在刹车片中,导致制动系统的温度快速升高。为了确保制动部件能够正常运行,EPFLoop 团队采用了传热和力学仿真相互耦合的方法来设计制动系统(图 4)。

他们使用 COMSOL 多物理场仿真软件中的“固体传热”接口分析了制动系统在制动过程中和制动后的温度分布情况,确保系统不会因过热而对超级高铁造成损坏。随后,他们使用软件的“平移运动”功能计算了由摩擦引起的功率损耗,从而估计制动器的温升情况。基于这些信息,他们对不同材料的刹车片进行了研究,这些材料包括皮革、热塑性聚氨酯、石膏,以及汽车行业中常用的一些刹车片材料。通过仿真分析,该团队验证了一种由外部供应商为他们定制的刹车片材料的可行性。该材料可将制动

系统的温度保持在所需的范围内,由此确定其确为最佳选择。

团队细致的仿真工作获得了认可, Benedetti 说:“一位评委称我们的方法‘极具吸引力’。”

⇒ **塑造人生的宝贵体验**

最令人印象深刻的并不是 EPFLoop 的客舱设计或其竞赛排名,而是项目本身对学生的影响。博士研究生 Nicolò Riva 是 EPFL 团队空气动力学小组的负责人,这段特殊的经历使他希望在学术界继续参与类似的项目。参加 2018 年竞赛的另一名学生 Zsófia Sajó 也表示,EPFLoop 激发了她对交通运输行业的太阳能和清洁能源研究的热情。

Paolone 博士对该项目的印象与其团队成员的观点一致。他的感受是,学生们留出自由时间,带着动力和奉献精神积极加入 EPFLoop 团队。他表示:“我们需要这样的人投入到为未来设计更加环保的运输方式。”❖



EPFLoop 团队。

# 利用遗传算法 优化超表面拓扑结构

基于自然选择的优化算法可以用来确定光学天线超表面的最佳设计配置。

作者 SARAH FIELDS

在工程领域,人们常常从自然界中汲取灵感,探索解决设计问题的新方法。无论是从动物翅膀周围的流体流动中寻求启发,为系统的冷却装置提供相关信息,还是研究鼻涕虫黏液以发明更好的医用黏合剂,亦或是模仿鸟喙的形状来设计高速列车的车头,人们总能在大自然中找到解决问题的方法,甚至获取最不可思议的设计方案中的关键。

从本质上来说,优化过程就是从一组控制研究系统的参数中系统性地选择输入值,使损失函数最小化的过程。即使在电磁超表面优化这样一个充满数学理论的世界中,人类向大自然寻求答案也不足为奇。

美国空军技术学院 (Air Force Institute of Technology) 的 Bryan Adomanis 对创建一种能够作为三维惠更斯源的像素化栅格天线很感兴趣;这是一种基于三维金属纳米颗粒的光学天线,既能够让信号仅沿指定方向传播,同时又能保持所需的幅值和相位延时。在这种天线的开发过程中,超表面几何结构是电磁响

**“由于问题具有的非线性和大范围参数空间,我们无法使用其他方法进行优化,它们要么计算量过大,要么无法找到全局最小值。在这种背景下,遗传算法可以顺利完成任务。”**

—— BRYAN ADOMANIS, 空军技术学院

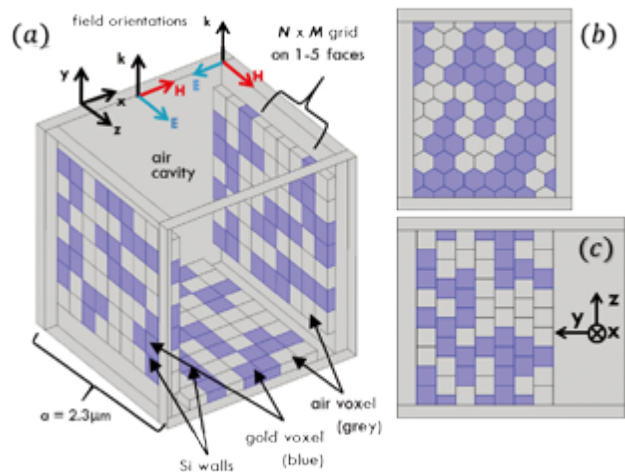


图 1. 可用于遗传算法的样本体素和腔体几何形状。图注: field orientations - 场方向;  $N \times M$  grid on 1-5 faces - 1-5 面上的  $N \times M$  栅格; Si walls - 硅壁; gold voxel (blue) - 黄金体素 (蓝色); air voxel (grey) - 空气体素 (灰色); air cavity - 气腔

应的主要驱动因素。因此,通过优化该三维像素(体素)栅格的几何形状,就可以找到具有较高前向散射和最小后向散射的最佳设计。

设计这种天线的挑战在于设计空间太大:体素可以是黄金,也可以是空气,而且天线的

几何构型存在多种可能,因此很难确定最佳设计方案。即便是分辨率最低的设计,也可以生成 240 种不同的模型(图 1)。图中的黄金和空气体素(立方体)分别用蓝色和灰色表示。COMSOL 多物理场仿真软件使用遗传算法(Genetic



Algorithm)程序,可以在大约 2000~4000 个模型中找到最佳解决方案或体素排列。另外,几何图形与性能(透射率和相位)之间没有可识别的相关性,因此无法建立最小化的函数。综合上述原因分析,建立 COMSOL 模型可以有效求解这些高度非解析模型。

本质上,这种像素化栅格天线是散射单元,其中的壁可以根据需要填充电介质和金属。在从近一万亿( $10^{12}$ )种可能的构型中为基于金属纳米颗粒的天线选择最佳几何形状时,一种借鉴了进化生物学现象、

受自然选择启发的程序就是我们要找的答案。

### ⇒ 遗传算法程序

“由于问题的非线性和大范围的参数空间,我们无法使用其他优化方法进行求解——它们要么计算量过大,要么无法找到全局最小值。在这种背景下,遗传算法可以顺利完成任务。”Adomanis 解释道。

在遗传算法(图 2)中,单个设计参数可视作基因存在于一组设计参数当中。每一组设计参数都表示一种专有设计,或者可以被视为个体,所有的单独设计构成一个种群。通过对种群中每个个体的

适应度进行评价,可以得到该个体成为下一代个体父体的可能性。

Adomanis 在遗传算法的实现过程中,用表示不同体素排列或天线设计的个体对种群进行初始化。他使用 MATLAB® 创建种群,为每组专有的参数生成二进制描述(或“掩码”),并引入遗传算法程序;然后将其提供给 COMSOL 模型。

**“我们基于模型中每个独立单元的结果组成了一个功能正常的全尺寸模拟镜头,因此我们对自己的设计充满信心。”**

—— BRYAN ADOMANIS, 空军技术学院

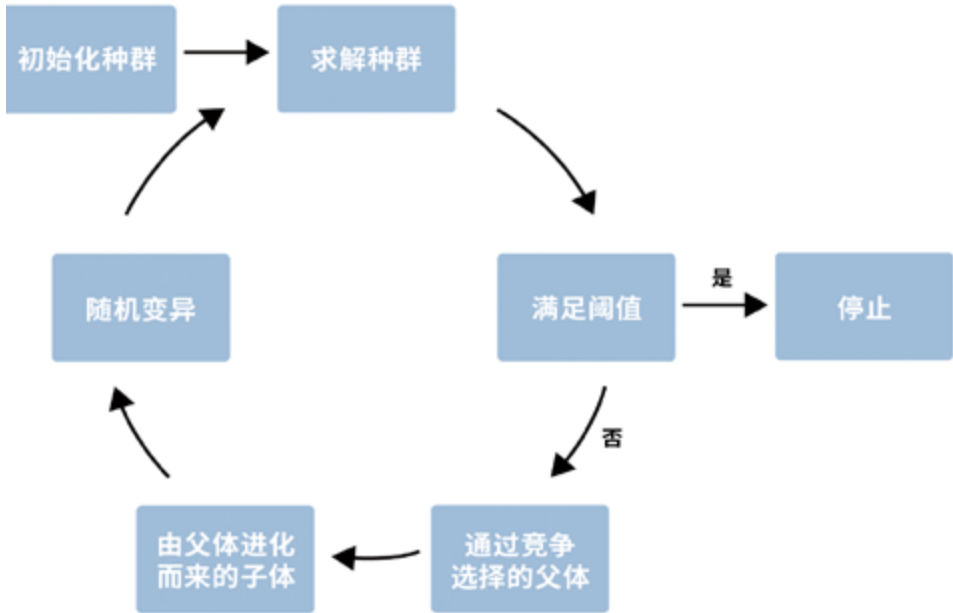


图 2. 遗传算法求解步骤。

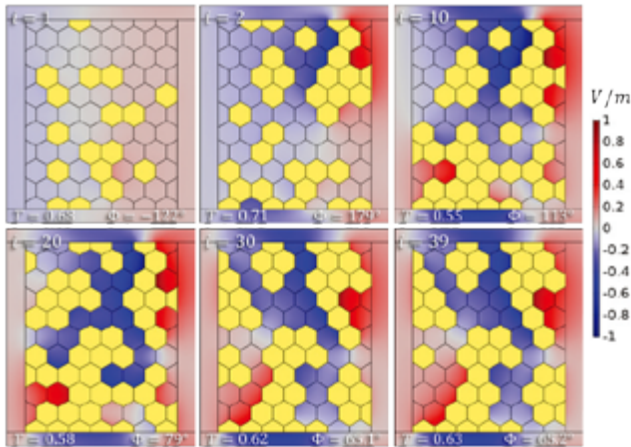


图 3. 仿真结果显示了在光学天线优化的中间步骤中产生的磁场(按 V/m 归一化)。随着拓扑结构的形成,强磁模式也随之形成。

随后,他利用多物理场仿真评价了单一个体对特定设计或是种群对一组专有设计的适应度。当结果满足表示所需分散程度的适应度阈值时,说明该个体适合进入下一次进化。在计算种群中的个体或群体对专有模型的适应度之后,系统会从程序

中删除不满足阈值的个体。下一代模型(或称“子体”)会由满足适应度阈值的专有模型填充而成,并通过“交叉”(在此过程中,由两个二进制表示组成的子字符串在子体中相互连接)和“变异”(在此过程中,二进制字符串的位被交换)实现进

化。Adomanis 通过 COMSOL 多物理场仿真软件的附加产品 LiveLink™ for MATLAB® 将 MATLAB® 与 COMSOL 多物理场仿真软件集成起来。

### ⇒ 收敛于最优设计

为了确定光学天线超表面的最佳拓扑结构, Adomanis 需要在保持幅值的同时, 优化总场透射率在给定方向的相位延迟。电磁建模功能可以帮助他实现这一点。借助此功能, 他可以设置遗传算法程序, 尝试多组不同的体素配置并计算产生的电磁辐射, 而无需深入研究复杂的物理现象。图 3 显示了天线的各个优化阶段产生的磁场。

随着遗传算法程序不断评价每一代个体, 选择父体, 填充子代, 然后评价子代的个体, 如此循环反复, 最终使种群趋向最佳设计(图 4)。一个参数空间有大约一万亿种可能的设计, 相比之下, COMSOL® 软件使用遗传算法程序, 能够基于几千个模型生成最优设计。

借助该程序, Adomanis 可以在各种相位值下使透射率达到最大。经过不超过 30 代的进化选择, 种群的特定设计便开始符合他所设定的性能标准(图 5)。

通过在多目标解空间中将其性能可视化, Adomanis 可以根据对特定应用最重要的准则

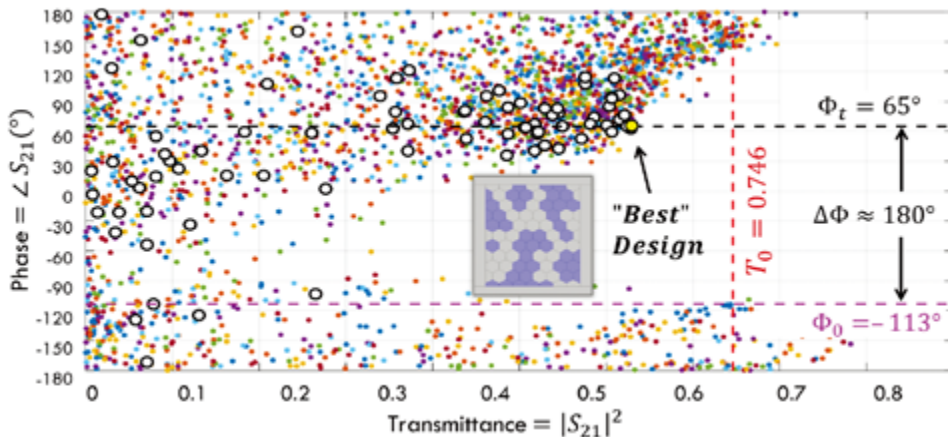


图 4. 透射率或散射参数  $|S_{21}|^2$  与相位的关系图。每一代采用不同的颜色。图注: Best Design - 最佳设计; Phase - 相位; Transmittance - 透射率

来选择设计。在一种设计中, 他可能会优先考虑最大透射率, 而在另一种设计中, 他可能希望优先考虑相位延时精度。

Adomanis 能够成功地基于像素化栅格生成共存的电偶极子和磁偶极子, 该栅格仅在正向产生总场, 几乎没有反向散射。通过将遗传算法程序与电磁仿真相结合, 他可以生成一个在整个  $2\pi$  相空间中起作用的光学天线。图 5 显示了这样一个例子。“在这项工作中, 我们第一次使用三维遗传算法来优化像素化栅格天线的拓扑结构”Adomanis 评论道。

### ⇒ 先进设计变成现实

在 Adomanis 使用遗传算法程序确定最佳设计之后, 他又迎来下一个挑战: 基于优化设计创建真实原型。然而, 由于光学天线的最小特征尺寸约为 100 纳米, 为此需要专门开发一种新的加工工艺才能实

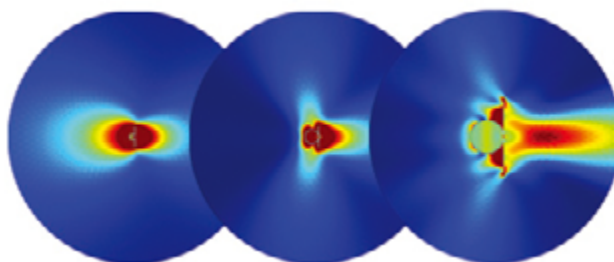


图 5. 对光学散射体 (称为  $\Omega$  粒子) 几何结构进行遗传算法优化, 目的是设计一个散射体, 使其从左到右分别达到最大前向散射和最小后向散射。

现这一概念。

为实现这一目标, Adomanis 正与美国桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratory) 一个能印刷天线的研究小组展开合作。他只需要为该研究小组提供优化后的像素化栅格(该栅格在他的仿真中产生了最佳正散射)。“我们基于模型中每个独立单元的结果组成了一个功能正常的全尺寸模拟镜头, 因此我们对自己的设计充满信心。”Adomanis 总结道, “能够使用 COMSOL 计算天线的性能给我们带来了极大的便利。如此一来, 我们就可以专注于实施遗传算法程序来优化设计, 而无需把精力耗费在对任意阵列的体素进行电磁计算上。”



Bryan Adomanis, 空军技术学院

# 用仿真营造舒适家居

Eurac Research 研究中心的科学家使用仿真技术提高了建筑物的能量利用效率, 并改善了人们的视觉和温度舒适度。

作者 **JENNIFER HAND**

提高建筑物的能量利用效率不仅可以为运营商节省资金, 还能够减少外部环境对建筑内部的影响, 提高建筑的居住舒适度。因此对建筑物而言, 能量利用效率是一个非常重要的因素。建筑外围的任何开口都会涉及窗户结构, 因此能量利用效率也是设计窗户结构时需要考虑的关键因素。窗户的框架、玻璃和遮阳附件, 以及门和天窗等组件对能量利用效率都有重要的影响, 它们可以调整直射进建筑物的阳光, 控制建筑物吸收的热量, 减少眩光, 使得白天时室内光线更加舒适, 并降低居住者对供暖、制冷和人造光源的需求。

ISO 15099:2003 国际标准给出了计算门窗系统热传输和光传输的程序。然而, 窗户结构中不同组件之间的相互作用, 可能对热量传输和光传输有着意想不到的影响, 但 ISO 15099:2003 标准并没有将这一情况考虑在内。标准中给出的计算方法也没有考虑门窗的一些结构特征, 如有些窗户的遮阳系统具有复杂的几何结构, 或者涂覆着特定类型的涂层(如高反射涂层)等。

“标准计算方法的主要问题是, 将所有遮阳系统(例如位于两个玻璃窗格之间的百叶窗)都作为平行层而不是三维结构来处理。”位于意大利北部波尔扎诺市的 Eurac Research 研究中心的研究员 Ingrid Demanega 解释, “尽管一些软百叶窗的百叶片是弧形的(图1), 但在计算时仍被当作空气流过的一维结构的开口处理, 仅采用压

降来计算对流传热数据。而且, 标准计算方法中还将百叶窗作为理想的漫射表面。这些近似的处理方法影响了窗户在光学和热学方面建模的准确性。”

由 Ingrid Demanega 领导的 Eurac Research 研究中心的一个研究团队, 与意大利的波曾-博尔扎诺自由大学(Free University of Bozen-Bolzano)建筑物理研究小组展开了合作研究。波曾-博尔扎诺自由大学的生活实验室中有一套商业化的窗户结构系统(图2), 通过对该系统开展实验测量并与仿真结果进行比较, 研究人员开始研究当前建模方法的局限性, 并提出了新的建模方法。

## ⇒ 创建新的光学模型

团队利用现有的窗户结构开始仿真工

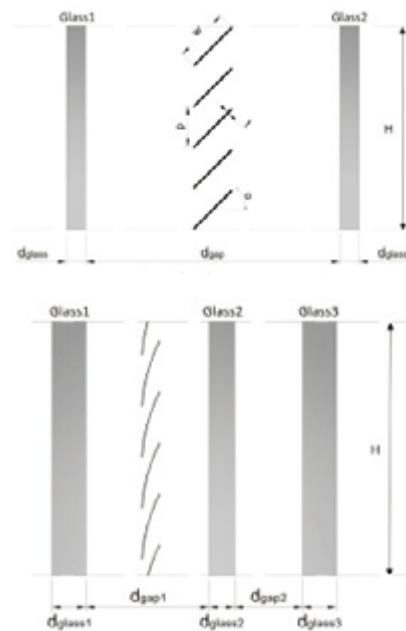


图1. 标准窗户结构(上)和复杂窗户结构(下)。图注: Glass - 玻璃

作。窗户由三层玻璃组成, 包含两个密封腔, 并且在在外腔内有一体式百叶窗。其中的板条呈弯曲形状, 涂有强反射涂层, 这样的设计可以有效地阻挡太阳辐射, 给建筑物内的居住者提供舒适的环境。研究的第一步是采用光学仿真来计算窗户结构吸收的太阳辐射量。



图2. 波曾-博尔扎诺自由大学生活实验室的实验装备, 包括两个热通量板, 一个由因斯布鲁克大学设计的用于测量总热通量的设备, 以及几个用于玻璃表面和空气温度测量的热电偶。

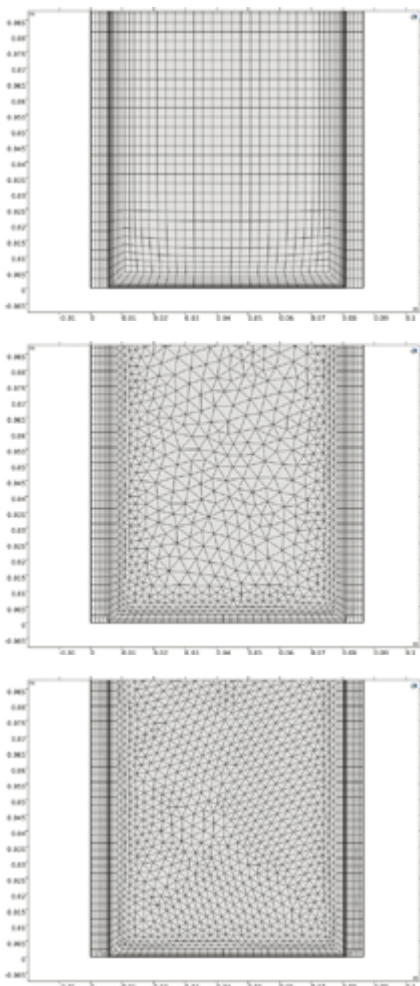


图 3. 有百叶窗的标准窗户结构的网格类型：标准结构化网格（上），粗化非结构化网格（中）和标准非结构化网格（下）。

主要的窗户结构仿真工具，如 Window7，是基于 ISO 15099 标准和光能传递原理设计的，研究人员可以通过添加更详细的建模数据来修改软件。Eurac 团队首先使用 Radiance 软件，利用双向散射分布函数获得数据。该函数描述了太阳光穿过窗户表面时如何分束以及强度的变化，因此适用于具有复杂几何形状和高反射表面的窗户结构。通过射线追踪以及对每块玻璃和每个遮阳组件的分析，研究团队计算了玻璃窗系统吸收的太阳辐射总量。

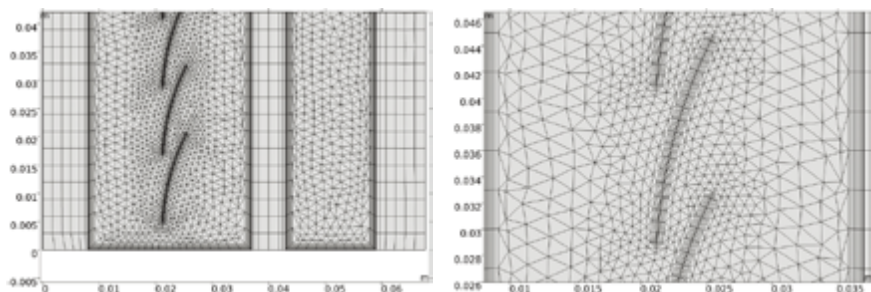


图 4. 左图为仿真所使用的窗户结构，从左到右依次为：第一块玻璃板，包含百叶窗的腔体，第二块玻璃板，仅包含氩气和空气的第二腔体，第三块玻璃板，其中两个腔体是密封的，不通风。右图为百叶窗周围和腔体边缘的网格特写图像。

### ⇒ 热通量和流体流动建模

研究人员随后将吸收的这部分太阳辐射导入 COMSOL 多物理场仿真软件中开展整体的热仿真建模工作。通过对实验室已有的窗户结构进行建模，Demaneaga 分析了不同网格的灵敏度（图 3）。在预分析中，她使用了布辛涅斯克近似，并分别对不可压缩流体与可压缩流体进行了仿真分析。“我发现，对可压缩流体进行仿真需要的时间要长得多，但两种仿真得到的结果相似，所以我决定在后续研究中使用不可压缩流体模型”她解释道。

为了计算辐射交换值，Demaneaga 对长波辐射采用表面对表面辐射的计算方法。她还创建了两个辐射组：一个用于第一腔体的内壁和腔中的百叶窗，另一个用于第二腔体的所有内壁。

“在考虑了不同的方法之后，我选择使用具有低雷诺数壁面处理的 k-ε 湍流模型来求解流体流动问题。这样就得到了一个结果准确的仿真模型。”

Demaneaga 在不同的区域使用了不同的网格设置：在腔体中使用三角形网格，在边界处使用映射网格。“我不断调整网格尺寸，逐步改进结果直至达到最好。最终的网格中差不多有 20,000 个单元。”（图 4）。

### ⇒ 稳态仿真

按照国家门窗评定委员会（NFRC）确定的夏季稳态边界条件，室外温度设定为 32 °C，室内温度为 24 °C，太阳辐射率为 783 W/m<sup>2</sup>。研究人员对百叶窗的三种状态进行模拟，分别是：百叶窗完全关闭的位置状态（此时百叶窗板条与水平面成 75 °角），几乎完全打开的状态（18 °角），以及处在中间的状态（37 °角）（图 5）。“经验证，使用 Radiance 和 COMSOL 多物理场仿真软件进行联合仿真是可行的。这意味着 Eurac Research 团队现在拥有一个强大的工具，可以准确评估复杂窗户组件的温度和通过窗户结构的热流。”

团队成员采用两种不同的方法开展仿真工作。第一种方法是使用 Radiance 软件进行光学建模，计算窗户对太阳辐照度的吸收值，然后使用 COMSOL 多物理场仿真软件计算传热和流体流动；第二种方法则是使用满足 ISO 15099 标准的 Window7 开展标准计算。

作为实验对照，研究团队还使用相同的静态条件对有百叶窗和无百叶窗的标准窗户结构进行了分析。仿真结果表明，对于没有百叶窗的标准窗户结构，两种仿真方法得到的结果一致；而对于有百叶窗的窗户，两

种结果存在很好的对应关系。

### ⇒ 加入时间变化的瞬态仿真

为了模拟窗户吸收热量的动态变化情况,研究团队将来自当地气象站的数据输入光学仿真软件中,并将窗户内部和外部玻璃的表面温度测量数据作为 CFD 仿真的边界条件。研究人员每隔 300 秒测量一次温度值,然后将这些离散的温度值作为边界条件导入 COMSOL 多物理场仿真软件中。之后用多项式函数对这些值进行插值,并将结果应用于对应的玻璃表面。研究人员将窗户结构内表面上的热通量仿真结果与同一表面上的测量值进行了比较(图 6)。

“我们非常高兴地发现,百叶窗在完全关闭状态下,通过仿真得到的结果与物理测量结果是一致的。由于窗户内外的环境不同,很难准确预测,但是我们的仿真工作通过了考验”,Demanega 解释说。

### ⇒ 实用的工具

使用 Radiance 和 COMSOL 多物理场仿真软件进行仿真通过了验证,这意味着 Eurac Research 团队现在拥有一个强大的工具,可以准确地评估复杂窗户组件的温度和通过窗户结构的热流。

Demanega 表示,基于仿真结果他们意识到,为了测量由辐射的吸收和再次辐射

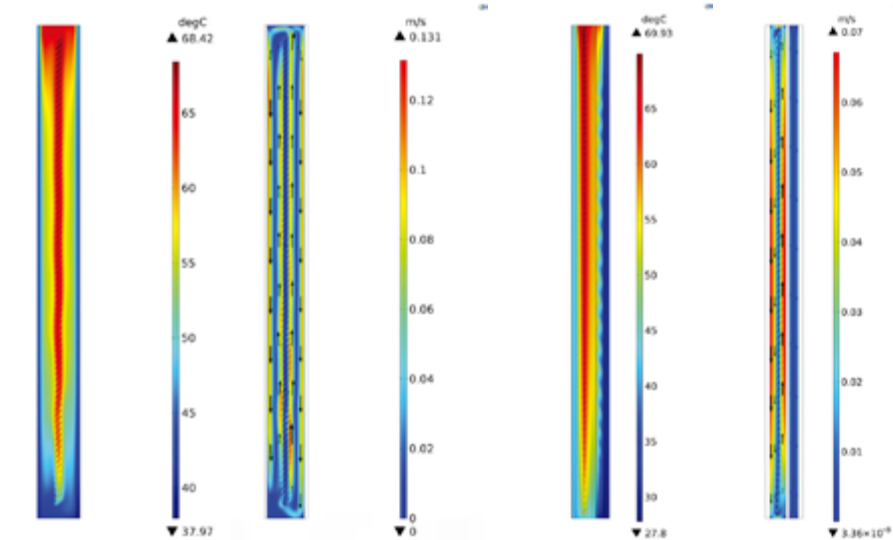


图 5. CFD 结果显示了对流因素对标准窗户结构(左)和复杂窗户结构(右)中窗户温度的影响。

引起的二次热增益,在热建模之前,先建立一个光学模型来了解初始太阳辐射,是非常有价值的。

“标准计算方法不考虑温度的垂直分布情况。而了解腔体、玻璃板和百叶窗的顶部到底部的温度分布是非常重要的,因为这些部件的温度会影响建筑物立面的结构完整性以及内部人员的舒适度。”

凭借所获得的知识,团队正在验证针对不同百叶窗位置的不同仿真方法,并期待将这些仿真方法应用于包含百叶窗的自然通风腔(具有双层外立面的建筑中通常会设有这种结构)。他们还在研究如何在建筑行业内传播这些经验,并正在考虑能否使用仿真

App,让广大专业人员可以对复杂窗户结构开展更广泛的建模工作。❖

### 致谢

本研究是在 FACEcamp 项目(编号为: I-TAT1039)的研究活动框架内展开的,由欧洲区域发展基金、Interreg ITA AUT 计划以及波曾-博尔扎诺自由大学的“IBAS——优化能源消耗和室内环境质量的智能楼宇自控系统”项目资助。



Ingrid Demanega, Eurac Research 研究中心研究员

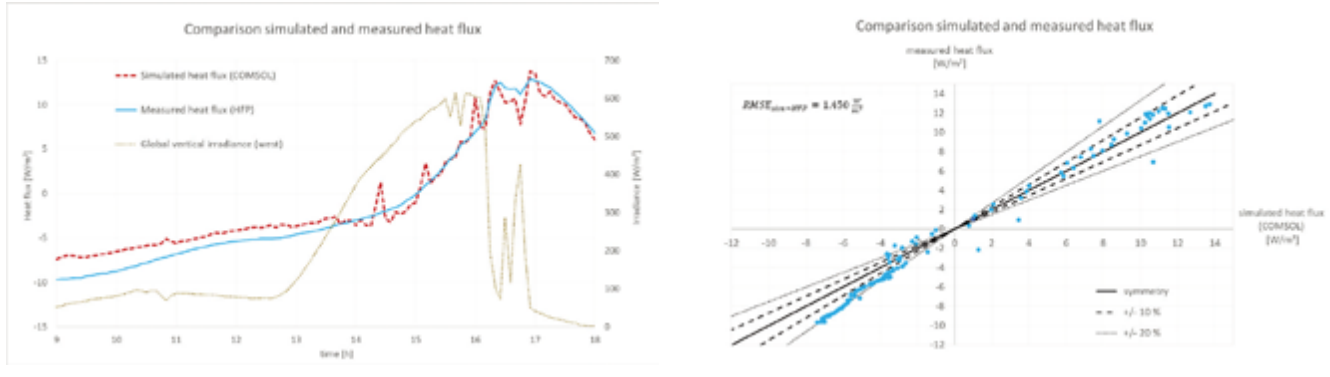


图 6. 以波曾-博尔扎诺自由大学的商业化窗户结构系统为研究对象,对窗户总高度范围内的内侧热通量进行瞬态仿真,得到的仿真结果与物理测量值之间的对应关系。

# 药学专业开设定量系统药理学课程

俄克拉荷马大学药学院药物科学专业的博士研究生正在学习如何创建多尺度模型, 用于分析药物在人体内的分布情况。

作者 **BRIDGET PAULUS**

相比传统的药物开发模式, 借助仿真的药物研发方式有很多优势: 例如优化药物剂量, 评估副作用, 改善临床试验, 降低研发成本并缩短上市时间等。因此美国食品和药物管理局(FDA)鼓励制药公司在药品开发过程中使用仿真工具。但制药公司却面临这样一个问题: 大多数药物科学仿真软件只包含少量的数学建模功能, 因此要找到一款具备强大仿真能力的软件非常困难。

为解决这一问题, 俄克拉荷马大学健康科学中心的定量系统药理学研究所和药学院于 2014 年合作开发了一门全新的课程。在这门课程中, 研究助理教授 Roberto A. Abbiati 为该校药学院医药科学专业的博士研究生设计了一门仿真课程, 讲述 COMSOL 多物理场仿真软件中的分析方法和建模流程, 目的是让学生们学习如何将仿真技术应用于药物动力学(药理学中研究人体对服用药物浓度影响的一个重要分支)。具体来说就是应用仿真模型来量化人体内和人体目标部位的药物浓度随时间的变化。对于那些可能挽救生命的治疗药物, 其在体内的浓度是新药开发中需要关注的一个重要问题。

## ⇒ 为下一代药理科学家讲授如何建模

药学专业的学生学习的科目非常多,

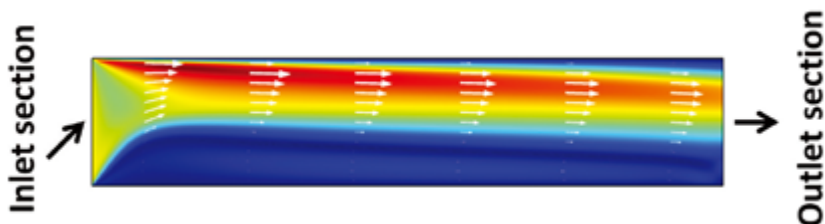


图 1. 通道中层流流动的速度分布图。图注: Inlet section - 入口截面; Outlet section - 出口截面

但通常不会包含仿真这门课程。Abbiati 认为, 学生缺乏仿真技能是一个需要关注的问题, “这不仅仅是考虑到制药公司的需要, 更重要的是建模和仿真能够帮助研发人员设计出更好的实验。”

Abbiati 的课程旨在教授药学专业博士生如何借助仿真软件的优势来开展工作。在课程的开始, 学生先学习使用 MATLAB® 软件, 这可作为学习其他类型数学建模软件的基础。随着课程的深入, Abbiati 和学生们将会进一步研究数值分析和有限元方法。

最终, 学生们将学习如何在 COMSOL 多物理场仿真软件中构建模型。Abbiati 带领学生们一步步地完成建模工作, 从构建几何结构(从二维结构开始, 如图 1 中的层流示例), 到建立物理模型, 再到确定模型的最佳网格(图 2), 并最终对结果进行后处理分析(图 3)。

课程会教给学生们如何创建房室模型和多尺度模型。前者是很多药物动力学

应用软件的基础标准, 与多尺度模型相比, 它的概念更容易理解。Abbiati 说, 标准的房室模型“假设人体是一个盒子, 盒子有一个输入通量和一个输出通量。”因此可以使用常微分方程进行描述。房室模型是确定人体内药物浓度随时间变化的一种简单方法。但是, 这一模型存在缺陷, Abbiati 说: “它无法确定药物在人体指定组织中的位置。这一问题严重制约了很多药物的开发工作, 其中就包括癌症药物的开发。”

多尺度模型与房室模型相比, 需要更详细地了解生理和生物过程, 但它能够得到

“我正在使用 COMSOL 多物理场仿真软件来研究为什么肿瘤的物理结构会成为药物输送的屏障, 以及屏障是如何发挥作用的。”

——ROBERTO A. ABAIATI, 俄克拉荷马大学健康科学中心助理教授

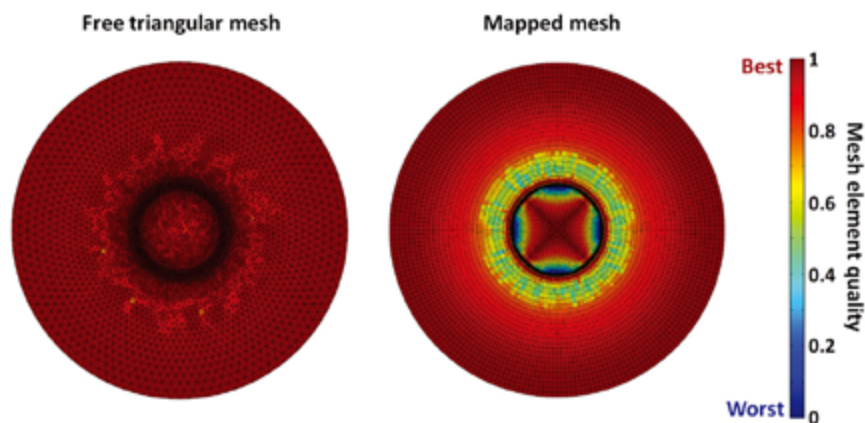


图 2. 用于向学生介绍各种网格选项的网格对比图。图注：Free triangular mesh - 自由三角网格；Mapped mesh - 映射网格；Mesh element quality - 网格单元的质量

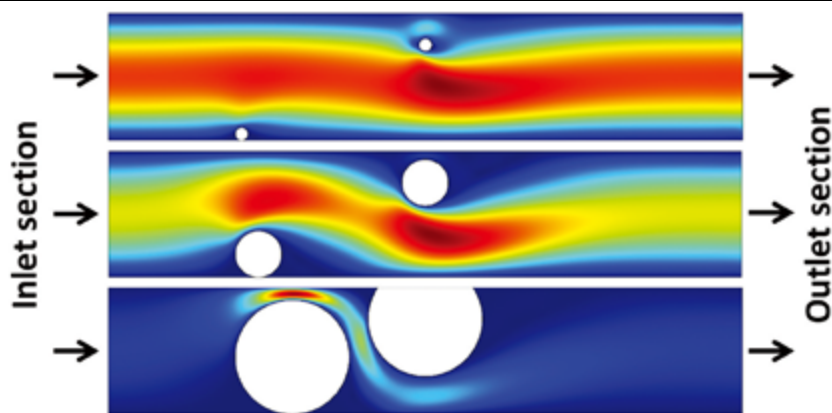


图 3. Abbiati 课程中的一个例子：几条通道中障碍物的尺寸各不相同，对应的通道中层流流动速度也不同。图注：Inter Section - 入口截面；Outlet - 出口截面

药物渗透进某个组织或器官的深度，这是非常有价值的结果。利用多尺度模型，研究人员可以对不同尺寸的结构开展仿真分析，大到整个人体或个体器官，小到单个细胞甚至分子尺度的结构。听起来构建多尺度模型似乎是一项很复杂的工作，但 Abbiati 通过循序渐进的讲授，使学生们很容易地掌握了这一建模方式。

### ⇒ 深入了解肿瘤治疗机理

Abbiati 博士与定量系统药理学研究所的同事，利用多尺度建模开展了多个研究，从而更加确定多尺度建模在药物动力学方面的优势。他目前正在研究药物与肿

瘤间的相互作用。“药物通常随血液流动，难以进入肿瘤内部” Abbiati 解释说，“这

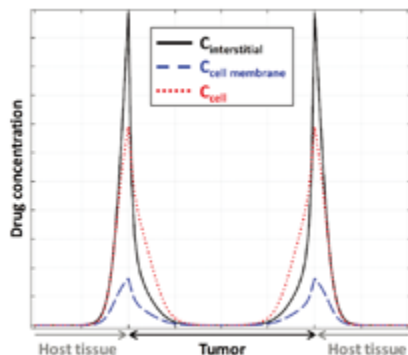


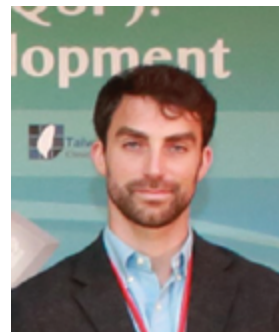
图 4. 肿瘤中的药物浓度曲线。图注：Drug concentration - 药物浓度；Host tissue - 宿主组织；Tumor - 肿瘤

是因为肿瘤中有‘多种限制药物输送的屏障’，例如肿瘤部位的血压通常比较高，因而阻碍了药物随血液的进入。”

“我正在使用 COMSOL 多物理场仿真软件来研究为什么肿瘤的物理结构会成为药物输送的屏障，以及屏障是如何发挥作用的。”Abbiati 说。为了能够深入了解其中的原理，他使用多物理场仿真来模拟微血管中的血液流动、肿瘤间质空间内的药物运输以及药物与肿瘤细胞的相互作用。Abbiati 模拟了肿瘤内压力梯度对血液流动的影响（假设血液中携带着药物）。之后，他选用软件中的“稀物质传递”这一物理场接口对药物浓度进行仿真分析。

Abbiati 表示，使用这个模型可以“根据药物结构随时间的变化来判断药物进入肿瘤的深度”（图 4）。使用多物理场分析的优势在于“描述药物在任意时刻和指定肿瘤部位的存留位置”。从他的研究中可以清楚地看出，多尺度建模是开展药物动力学的有效工具，这一建模方法使研究人员能够更好地了解人体对药物浓度的影响。

通过为药学专业的博士研究生开设仿真课程，Abbiati 教会了学生一项宝贵的药物研究技能，而这一技能可以极大地改善未来的药物开发过程。除此之外，该课程对学生自身的发展也大有益处。当他们毕业后就业时，对制药公司来说，掌握仿真技能的学生无疑更具吸引力。❖



Roberto A. Abbiati 俄克拉荷马大学健康科学中心助理教授

# 利用数值仿真对大坝进行地震安全评估

比萨大学的研究人员使用数值仿真研究各种地震事件中大坝安全评估的准确性和可靠性。

作者 **GEMMA CHURCH**

在所有类型的大型建筑物开发中, 结构完整性和遵守相关规范至关重要。数值仿真可以对此类评估提供很大的帮助, 但前提条件是评估使用的数学模型需要有合理的假设, 而对于大坝的地震安全评估这类问题, 则需要更严格的方法。大型建筑物结构的失效会造成巨大的安全隐患, 常常会导致严重的后果, 特别是在遇到地震时意味着更高的风险。

大坝是建造于河流和溪流之上的巨大屏障, 通过限制水流来达到灌溉和水力发电等目的。由于大坝会与土壤和水产生独特的相互作用, 传统的建筑建模技术不能直接应用于大坝。评估大坝-水库-土壤系统的行为是一项复杂的工作。多年来, 人们一直采用近似和简化的方法进行这方面的研究。然而, 意大利比萨大学的研究人员通过不断的努力和创新, 使大坝仿真的准确性和可靠性迈上了一个新台阶, 并有望使这些庞大建筑在未来变得更加安全。

在地震激励作用下, 混凝土重力坝、水库和地基形成一个耦合系统。目前尚没有一种准确的方法可以对这种复杂系

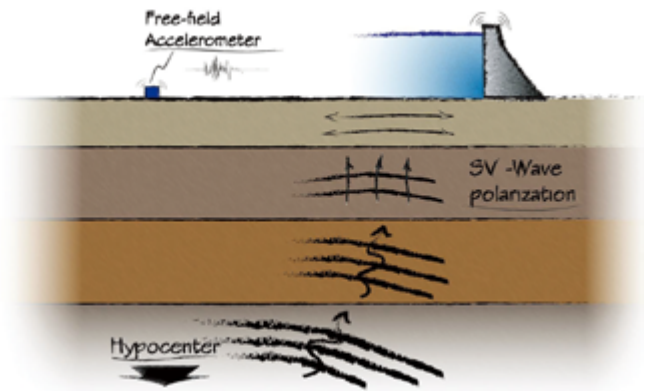


图 1. 地形上因地震产生的弹性波示意图。图注: Free-field Accelerometer - 自由场加速度计; SV-Wave polarization - SV 波极化方向; Hypocenter - 震源

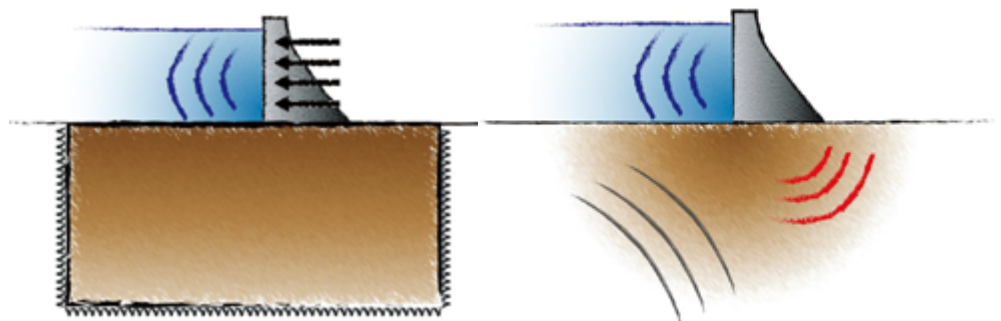


图 2. 无质量地基模型(左)与无限地形模型(右)之间能量传递方向的比较图。



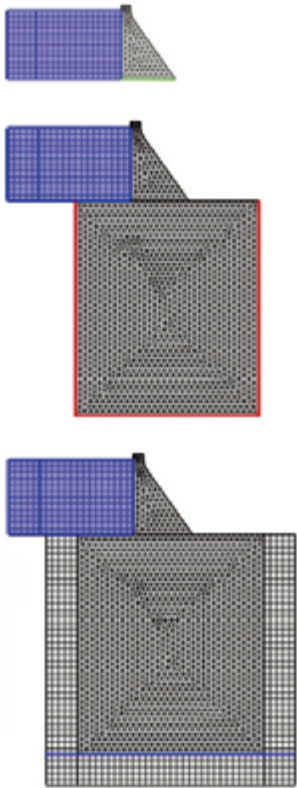


图 3. 以上三种建模技术采用的几何形状:刚性地基(上)、无质量地基(中)和无限地形(下)。

统进行评估,因此人们经常忽略土和结构间的相互作用,或直接通过简化假设进行粗略估计。但是不考虑这些相互作用会产生某些风险,例如坝体的内部可能出现没有预计到的大应力。

### ⇒ 土壤和结构相互作用

运动学效应和惯性效应都是土和结构相互作用的一部分,然而人们却很少考虑惯性效应。土壤运动学受土体柔度控制和结构刚度的影响,而惯性效应则受结构和土壤密度特

性的影响。构成大坝的混凝土砌块在受到震动时会在土壤中来回移动,但土壤是有质量的,不会简单地随着混凝土板的移动而运动。土壤和结构会相互影响,这种相互作用产生的弹性波会穿过土壤,将能量从系统中带走(图1),这一现象被称为“辐射阻尼”。

目前,模拟土壤对抗震性能的影响有几种方法,但都有不足之处。在传统的建筑模型中,人们基于土壤类型以代码的形式提供响应谱来考虑土壤效应。然而,传统建筑与大坝之间存在结构上的差异,因此套用这些方法并不完全合适。再者,就水坝而言,一种称为“无质量地基”模型(图2)的技术已经在坝基分析中得到了广泛的应用,这种方法只根据土壤边界的柔度和位移对土壤进行建模。模型中忽略惯性效应,并假设土壤“无质量”,系统中的所有动能都转移到坝基上,这种假设与实际不符,并且会导致

地震响应被严重高估。

### ⇒ 利用仿真提高复杂度

借助数值仿真的方法,比萨大学土地和建筑系统能源工程系的 Matteo Mori 能够在他的仿真中探索完整的土壤-结构相互作用。“COMSOL 多物理场仿真所具有的灵活性使其成为我们使用过的最直观易用的软件。该软件中用于研究弹性波或声波的功能丰富,对我们的研究非常有用。”Mori 评论道,“这款综合性软件是我们研究的有力工具。”

在使用任何新技术对混凝土重力坝进行模拟时,都需要结合具体情况考虑方案的可行性。因此 Mori 决定使用三种模型对不同的场景进行模拟。他研究了每个系统在地震激励下的动态响应,并对分析结果进行了比较。这三个模型是刚性地基模型、无质量地基模型和无限地形模型,如图3所示,每个模型都比前一个模型更加

成熟复杂。

图中,蓝色矩形区域表示水库,三角形区域表示大坝,大矩形区域表示土壤。无质量地基模型中的土壤域就是无质量土壤,其中只有柔度和位移。为了确保不同模型间的一致性,Mori 在坝基上设置了水平谐波加速度边界条件(绿线、红线和蓝线),用来模拟地震激励,使这三个模型具有相同的坝基加速度。其中第三个模型使用了 COMSOL 多物理场仿真软件提供的全局方程功能,可以让弹性波通过边界。

无限地形模型的一个关键是土壤周围的完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)。这是 COMSOL 多物理场仿真软件中的一个强大功能,PML 可以吸收所有入射波,无论角度和频率如何,都可以防止入射的波在边界反射回介质中。此功能有助于将辐射阻尼和能量耗散结合起来,从而将无界的土壤域设置为一

“COMSOL 多物理场仿真软件所具有的灵活性使其成为我们使用过的最直观、易用的软件。软件中用于研究弹性波或声波的功能丰富,对我们的研究非常有用。这款综合性软件是我们研究的有力工具。”

—— MATTEO MORI, 比萨大学土地和建筑系统能源工程系研究人员

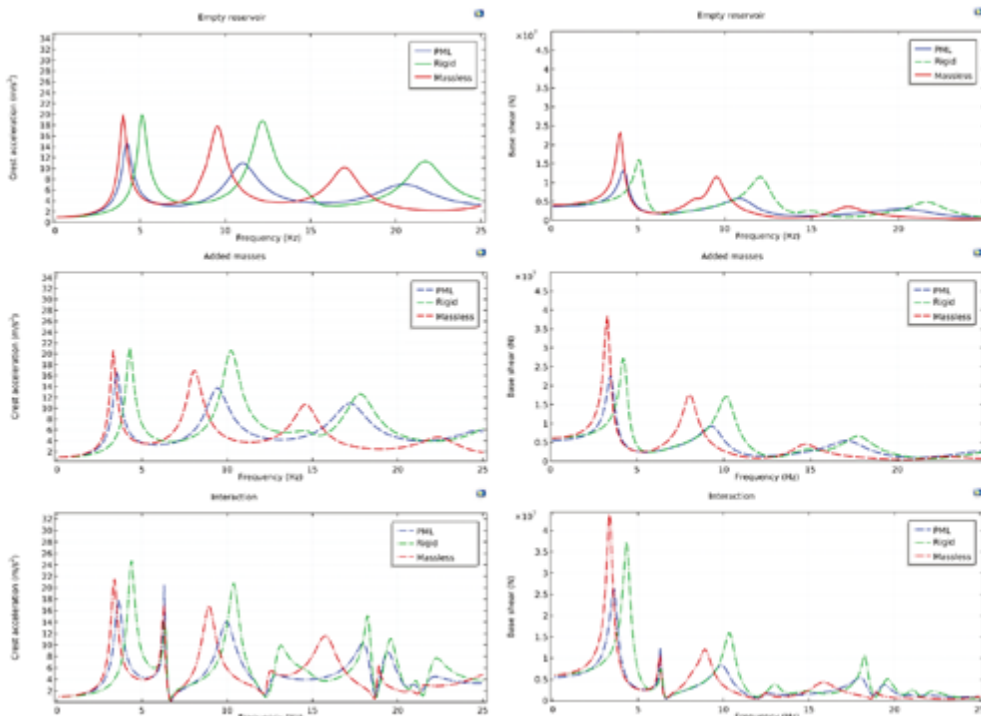


图 4. 空水库的基底剪力和峰值加速度(上), 附加质量法(中)以及全弹性波耦合法(下)。

种完美吸收材料, 实现在不反射任何能量波的情况下使混凝土板产生衰减振荡。

Mori 解释说:“COMSOL 多物理场仿真软件提供了合适的工具来执行准确的多物理场仿真, 包括完全耦合的流-固耦合分析和无限域。”基于小振动和忽略黏性这一假设, 可以使用亥姆霍兹方程求解流体子系统, 用固体力学求解土壤和大坝子系统, 并用 PML 功能模拟无界地形。

⇒ 具体情况, 具体分析

通过对 65 米高的混凝土坝体的不同使用情况(空水库和满水库)的分析, 可以评估无限地形模型的可靠性。在此

基础上, 还可以通过以下两种方式模拟水库满水的情况: 全弹性波耦合以及简化的“附加质量”模型。附加质量也称为“虚质量”, 是一种模拟库中水动力效应的方法。因为坝体和水不能占据同一空间, 所以当混凝土板加速时, 它必须移动邻近的水。这样就会增加惯性, 也就是说会增加混凝土板的有效质量。

研究人员采用不同技术(刚性地基、无质量地基和无限地形)针对每一种库盆场景(空水库、附加质量和完全相互作用)进行计算。与刚性地基和无质量地基模型相比, 无限地形模型(图 4 中的蓝色曲

线)在所有三种情况下均显著降低了峰值响应并使其变得平滑。正如预期的那样, 这种平滑是新实施的辐射阻尼作用的结果。这是由于系统中的能量被消散到无界土壤地形(通过 PML 模拟)中, 因此更小、更符合实际的动能被传递到混凝土板中。而另外两种建模技术无法涵盖这一现象。

不仅如此, 机械位移、流体压力和机械能流也存在着明显的差异, 如图 5 所示。无质量模型显示的是未定义入射波方向的循环流线(表示声能通量), 而无限地形模型的能量通量具有清晰明确的方向。这从趋势上清晰地表明辐射阻尼将能量

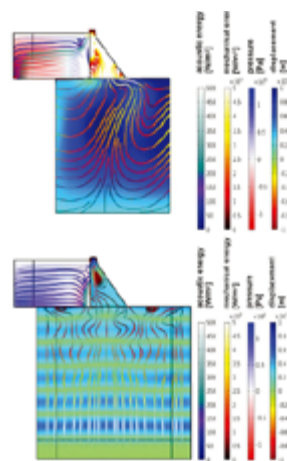


图 5. 无质量地基(上)和无限地形(下)的机械位移、流体压力和机械能通量流程图。

从系统传递出去, 并证实了较少的能量被转移到大坝中。

⇒ 现在和未来的工作

“模型是否能够真实地描述实际情况是我们遇到的最大挑战。由于我们的研究并不是一个完美的数学问题, 因此很难实现准确预测。无限地形模型可以被认为是一种很好的解决方案, 但仍需要进一步完善, 这也是我们目前正在进行的工作。混凝土是一种脆性材料, 因此我们希望能够诊断出大坝结构中的裂缝。”Mori 解释说。

他们计划通过实验从监测地震活动的加速度图谱数据中提取卷积, 以便在模型中设置更准确的边界条件。这一举措将极大地提高模型的准确度, 为意大利乃至全世界的大坝仿真做出巨大的贡献。❖

# 多物理场仿真 推动智慧城市发展

研究人员使用仿真技术设计出创新的模块化实用配电箱,以应对未来智慧城市的需求。

作者 SARAH FIELDS

电源箱是一种用来对邻近区域内住宅的电力供应进行控制的设备,通常安装在街道中。在美国以外的国家或地区,电源箱通常被称为馈电柱,在中国常被称为配电箱。电力在城市生活中发挥着重要作用,并且民众对市容美观的要求越来越高,迫切需要将配电箱的体积变小。

为了将长距离电力线输送过来的高压电降低为适合家庭和企业使用的低压电,传统配电箱在设计时需要保留必要的、降低电压的硬件设备,因此当前使用的配电箱体积庞大。减小配电箱的尺寸是一个值得追求的目标,却给电力布线带来了额外的挑战,那就是既要在较小的体积内完成布线任务,又要保证电阻和洛伦兹力符合要求。实现这一任务的难度非常大。

Raychem RPG 公司研发部首席研究员 Ishant Jain 利用其多年的仿真经验,设计了一款满足智慧城市和有限空间需求的配电箱。在完成这一全新设计的过程中,Jain 和公司的研发团队遇到了很多工程挑战,而借助于多物理场仿真,他们很好地应对了这些挑战。

## ⇒ 配电箱是如何工作的?

如果不是这篇文章,你可能并不会想起人行道附近那个有点突兀的金属箱。虽然很常见,但是你了解配电箱的工作原理吗?

配电箱有一层外壳,用来保护内部的配电系统。设置配电箱的目的是将电能通过低压

电源线(适合进行短距离电力传输)分配到家庭和企业中。配电箱不仅可以减少电能的物理损失,还能够根据电能的使用情况更加精准地分配电力。

“配电箱占用的空间如果能更小一些,肯定是非常有益的”Jain 说,“我们可以创建一个包含现有配电箱所有功能的模块化单元,以适应 21 世纪城市发展的需求。”

Jain 和他的团队敏锐地意识到,传统配电箱的设计有许多可以改进的方面。例如一些不合标准的连接,会导致成本偏高以及电力损失。通过升级改造可以降低成本及电能损失;当然还可以在安全性、尺寸、安装简便性、可维护性和美观等方面做出改进。

Jain 和他的团队也在积极创造适用于智慧城市的未来配

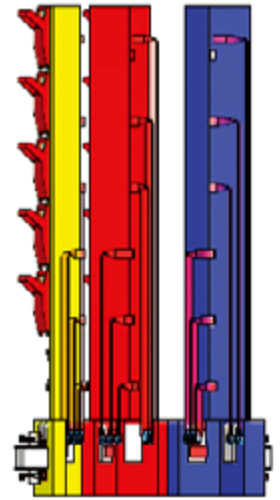


图 1. 与传统配电箱相比,新型母线系统占用的空间更小,但向外发送的电能可以保持不变。

电箱。这种全新的配电箱将具有智能功能,能够在线监测能源使用,以及监控系统和各个保险丝的安全运行状况。

## ⇒ 将电动势降到最低

要想将配电系统放进一个

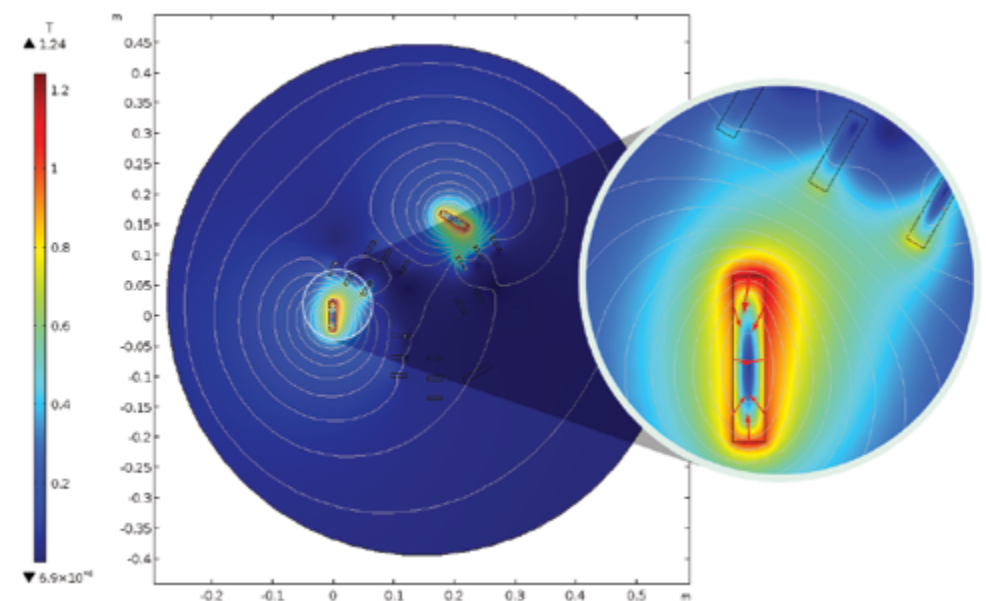


图 2. 三相配电箱的磁通密度的模值(表面图)和麦克斯韦表面应力张量(N/m<sup>2</sup>, 箭头图)。

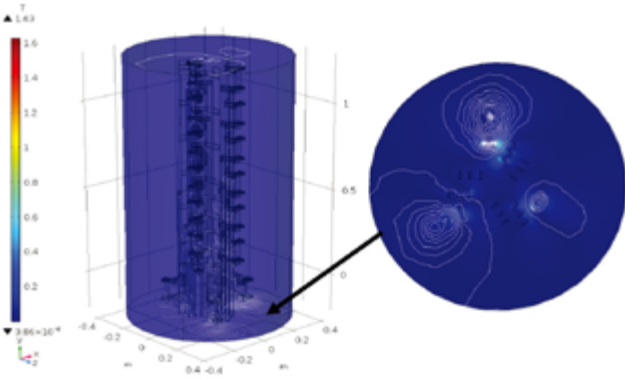


图 3. 电源箱内的磁通密度。

非常小的外壳，就需要减小配电系统的结构尺寸，但尺寸的减小会引起电磁力的增加，这是我們不想看到的。因此要减小电力系统的尺寸，需要面对的一个直接挑战就是保证电磁力不增加。

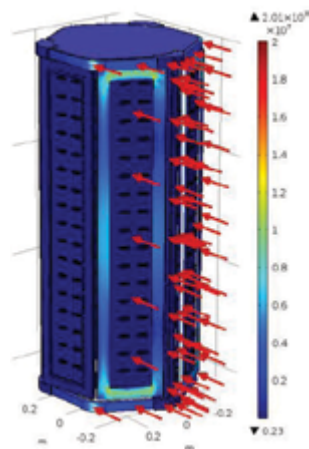


图 4. 风速为 103 m/s 时引起的 von Mises 应力。

由于物理现象的特性和复杂的几何形状，要确保设计的稳定性，工程师对多物理场仿真的需求显而易见。

为了显著减小配电箱的尺寸，工程师需要创造一种尺寸小、但分配功率不变的母线板系统（图 1）。

Jain 和他的团队创建了一个二维仿真，以确保他们的设计能够减少电磁力的累积影响（图 2 和图 3）。仿真结果显示，

当面板以  $120^\circ$  的方式排列时，可以平衡作用在母线板上的力。“仿真结果让我们相信，新设计是可行的。我们可以看出，通过  $120^\circ$  的排列方式，电动势是能够达到平衡的。”Jain 解释说。

### ⇒ 确保热和结构性能

设计过程中要考虑的另一个重要因素是配电箱整体结构的稳固性。Jain 和团队对配电箱的结构进行了仿真，以评估其耐用性。他们对结构施加了高达 103 m/s 的风力，通过研究结构随时间的变化情况，确定配电箱在结构上的合理性（图 4）。工程师们还在模型中逐渐增加边界载荷，直到机构中的次生应力达到临界值。他们最终确定设计结构可以在 570 m/s 的风速下安全运行。

研究人员还对整个面板组件进行了瞬态传热分析，用于确保系统在运行中的热性能可以满足需求。经验证的仿真模型为团队提供了设备在一些特殊运行条件下的温升情况，而这些情况几乎无法通过实验来评估。对连接器进行优化可以得到比前代产品更加安全、高效的设计结构（图 5）。最终的设计以模块化的形式呈现，并且能够进一步扩展（图 6）。

### ⇒ 多功能建模促进设计优化

Jain 和他的团队创建的新设计结构（图 6）要比以前的设计小得多，但仍然能够像传统电源箱一样传递相同大小的功率和电流。最终设计出的配电箱小于市场上所有配电箱，并且具有良好的热性能和传输效率。

“使用多物理场仿真，我们能够确保新型设计的结构完整性”Jain 总结道，“随着它在世界范围内的广泛应用，其效益和影响都将是深远的。”

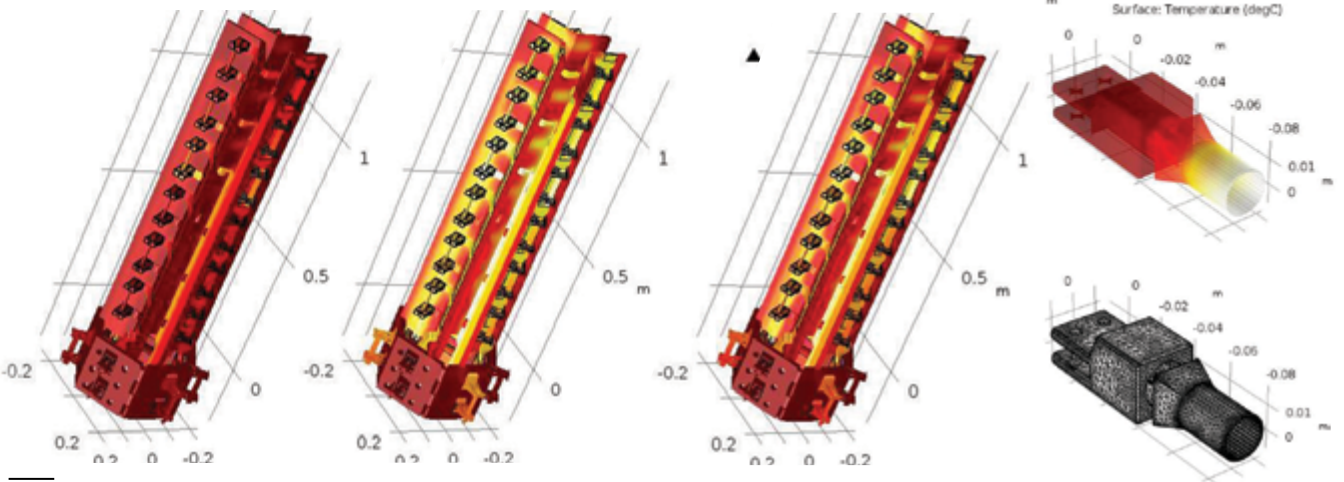


图 5. 配电箱热分布的仿真结果（左）；配电箱和连接器热分布的瞬态分析仿真结果（右）。

最终的配电箱设计还包含智能功能,如安全和防盗系统远程监控能量,保险丝健康状况和热量曲线的功能。这种新设计中的连接器电阻损耗更低,并且由于其中含有保险丝绝缘外壳,所以在系统运行时更加安全。

在设计一款体积比行业标准尺寸小几倍的配电箱过程中,Jain和他的团队将多物理场仿真应用到设计过程的每一步,并凭借新的设计和高效的母线系统,最终成功地改造了传统配电箱的结构。❖

本研究项目是在 Raychem RPG 有限公司的支持下完成的,对 Raychem 公司创新中心 of D Sudhakar Reddy 在项目期间的指导,表示衷心感谢。感谢

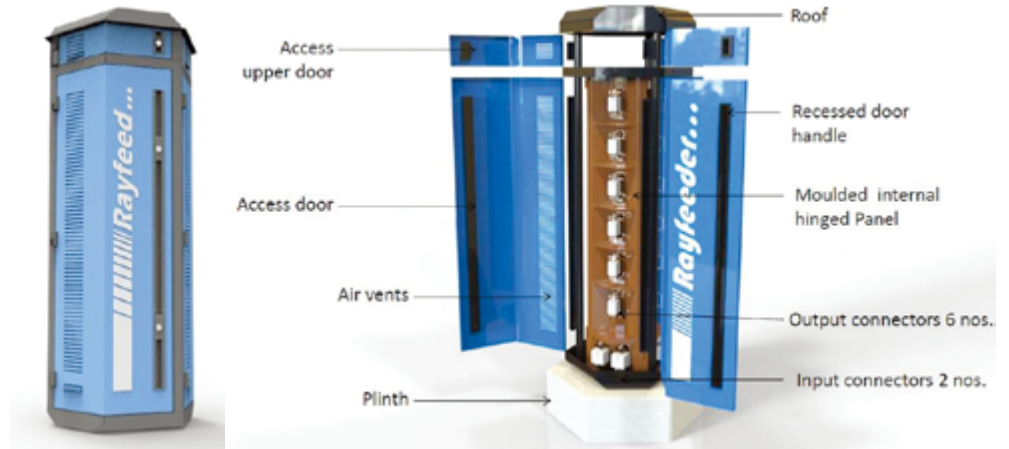


图 6. Raychem RPG 公司的工程师设计了一种全新的智慧城市电源箱。图注: Access upper door - 上部检修门; Access door - 检修门; Air vents - 通风口; Plinth - 柱基; Roof - 顶板; Recessed door handle - 内嵌式门把手; Moulded internal hinged Panel - 铸造成内部铰链板; Output connectors 6 nos - 6号输出连接器; Input connectors 2 nos - 2号输入连接器

Sumit Zanje, Nitin Pandey, Sanjay Mhapralkar 和 Jayesh Tandlekar 在工作中的坚持不懈和奉献精神。同时还要感谢 COMSOL 团队,他们的洞察力和专业知识为研究工作提供了极大的帮助。

“使用多物理场仿真,我们能够确保新型设计的结构完整性。随着它在世界范围内的广泛应用,其效益和影响都将是深远的。”

—— ISHANT JAIN, RAYCHEM RPG 公司研发部首席研究员

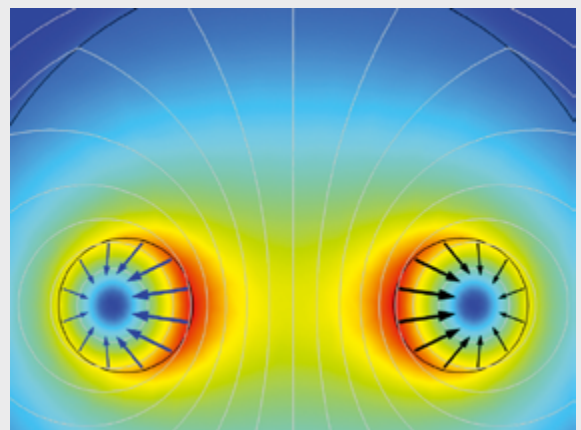
## 在 COMSOL® 软件中计算洛伦兹力

作者 Durk de Vries

当电流通过磁场时,产生的电磁力被称为洛伦兹力(不同于静电力或磁铁之间的力)。配电箱中的母线受到的电磁力就是洛伦兹力。洛伦兹力的存在会产生两个问题,一是洛伦兹力如果太大,会破坏母线系统。电磁炮这一武器充分说明了洛伦兹力能的强大性。当电流足够大时,洛伦兹力可以将母线系统撕开。另一个问题是系统负载不断变化,从而出现疲劳问题。

在 COMSOL® 软件中,可以通过不同的方式计算洛伦兹力的大小。一种方法是利用麦克斯韦表面应力张量,该张量的投影仅在母线的外部边界上有效,投影值即为电磁压力。在 AC/DC 模块的“磁场”物理场接口中,“力计算”域功能可以计算此压力的积分得到集总量,例如母线受到的总力和扭矩,或者可以将该电磁力作为局部压力分布作用到结构力学计算中。

确定洛伦兹力的另一种方法是计算电流密度  $\mathbf{J}$  和磁通密度  $\mathbf{B}$  之间的叉积。这种计算方法得到的值被预定义为洛伦兹力。将全部体积上的



平行载流导线上的电磁力。

矢量场进行积分,就得到了母线受到的总力。一般而言,体积分法比表面应力张量边界积分法得到的数值更加准确,但边界积分法更通用。研发人员利用平行载流导线,对这两种方法的计算过程进行了演示,可在 COMSOL 官网的“案例下载”页面中找到该教程模型。

# 通过数值仿真抑制电池内的枝晶生长

数值仿真推动锂离子电池研究新方法的发展。

作者 SARAH FIELDS



锂离子电池的形式多种多样, 既有用于移动电子设备的叠片式锂离子电池, 也有用于工业电动工具的圆柱形电池, 还有用于储能系统的其他圆柱形电池等。村田制作所 (Murata Manufacturing Co., Ltd.) 的研发部门正在利用多物理场仿真来检验使用锂金属作为负极材料的电池。

枝晶(一种针状生长物)是高效锂离子电池最大的安全隐患。当电流作用于锂金属电极时会形成枝晶, 从而可能引起不必要的副反应导致短路, 严重影响电池的使用寿命。

抑制枝晶形成是电池行业的一个重要研究领域。大多数研究人员通过以某种化学的方式抑制枝晶形成, 以此来解决这一现象带来的安全隐患和电池寿命问题。然而, 相关研究的进展一直非常缓慢, 促使一些研究人员另辟蹊径, 以尽快解决这个问题。

村田制作所的研发工程师 Jusuke Shimura 在检验使用锂金属作为负极材料的电池时, 研究了充电模式对枝晶形成的影响。

电池行业正在飞速发展, 以满足电气化和可再生能源时代的需求, 这种方法在电池和储能领域的应用越来越广泛。

## ⇒ 使用多物理场研究尽可能减少枝晶

当电流作用于锂金属电极时, 可能产生锂枝晶而导致短路。Shimura 评论道: “为了使采用锂金属电极的锂离子电池走上商业化道路, 我们必须解决这个问题。”

在他的方法中, 最关键的一点是确定可以最大限度抑制锂枝晶生长的充电模式。这是因为在脉冲间隔期间, 电极界面上的浓度梯度减小, 从而削弱了枝晶的堆积。此外, 在电流模式中引入反向脉冲对反复溶解已形成的枝晶也起着重要的作用。

为了在几何模型中分析电化学反应, Shimura 利用了 COMSOL 多物理场仿真软件的电池建模功能得到仿真结果, 并结合实验数据确定了最佳的充电模式。

一直以来, 许多研究人员都从化学和材料的角度来探索这一问题的解决方案。为了在这一领域取得进展, Shimura 想通过实验理解他所研究的物理系统背后蕴含的原理。对他来说, 了解枝晶形成过程中枝晶的形状变化非常重要。为了实现这一目标, 他制作了一种可以与 X 射线计算机断层扫描 (CT) 兼容的叠片电池。这种电池的电解质膜中含有造影剂, 因此可以直观地测量枝晶形成随时间的变化情况 (图 1)。

“我创建了一个可以用 CT 进行成

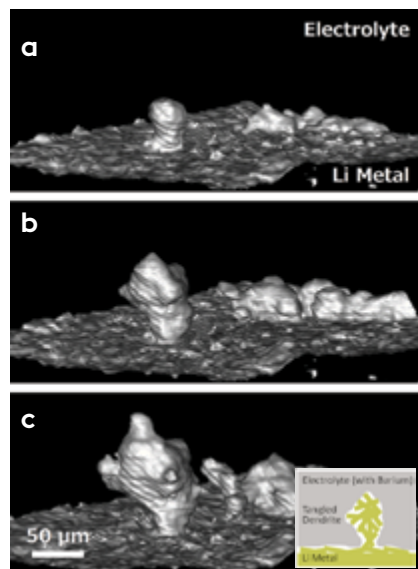


图 1. CT 结果显示, 在  $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  的流动电流下分别作用 6 h (a)、13 h (b) 和 20 h (c) 后, 电解质膜表面被产生的锂枝晶推高的情况。图注: Electrolyte - 电解质; Li Metal - 锂金属; Electrolyte (with Barium) - 电解质 (含钡); Tangled Dendrite - 缠绕的枝晶

**“感谢 COMSOL 让我们能够通过基本原理的仿真方法优化充电模式, 以改善电池的使用寿命。”**

——JUSUKE SHIMURA, 村田制作所的研发工程师

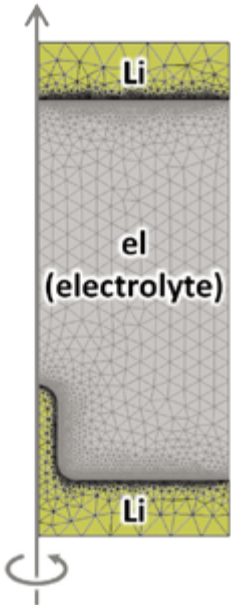


图 2. 锂离子电池几何形状的网格。图注:electrolyte-电解质

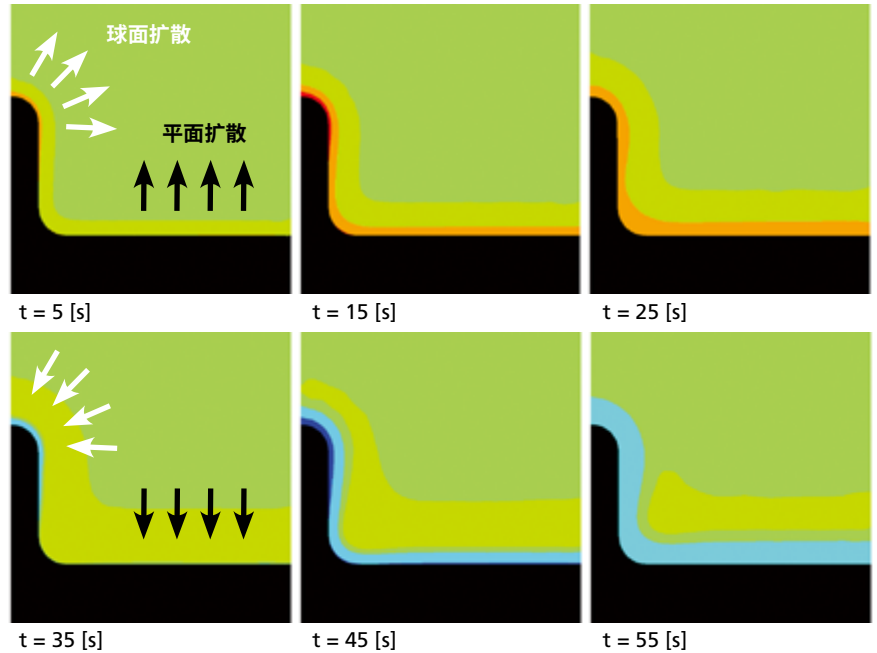


图 3. 不同脉冲充电模式下,枝晶生长的仿真结果。

像的叠片电池,这样我就能知道枝晶的形成位置。然后,我使用 COMSOL 多物理场仿真软件根据枝晶的形状和大小找到最佳的充电脉冲模式来限制枝晶的生长。”Shimura 解释道。

Shimura 通过基于 CT 数据创建的锂金属电池模型,分析了改变电流模式所产生的效果。仿真结果可以清晰显示金属锂枝晶的沉淀量(图 2)。

Shimura 利用多物理场建模对各种电流模式进行了评估,找出了将枝晶形成速度降至最低的电流模式(图 3)。这种方法使他能够通过脉冲模式的一个周期来确定哪里有更多的锂沉积:是具有平面扩散的电极表面(图 3 底部),还是具有球面扩散的枝晶(图 3 左侧部分)。

他最终发现,在施加反向脉冲 20 秒,间隔时间 10 秒;正向脉冲 20 秒,间隔时间 10 秒的模式下,如此循环往复,可以最大程度地抑制枝晶生长(图 4)。

“通过使用这种模式,枝晶的生长速度不到原来的三分之一。这一改进仅仅是通过改变充电模式实现的,其化学成分仍

保持不变,” Shimura 解释说。

Shimura 的仿真以实验确定的枝晶大小为依据,使用了 COMSOL 多物理场仿真的电池建模功能,通过浓度相关的 Butler-Volmer 方程模拟电极反应,并使用耦合的扩散-迁移方程模拟电解质内的锂离子传输。

### ➔ 开发面向未来的电池

借助仿真分析,Shimura 找到了为锂离子电池充电的最佳脉冲模式。与施加直流电相比,这种方法使电池寿命延长了三倍。“在 COMSOL 多物理场仿真软件的帮助下,我们能够通过基于第一性原理的仿真,验证优化的充电模式可以改善电池的使用寿命”Shimura 说道。

展望未来,Shimura 认为在他们的研究持续快速发展的过程中,多物理场仿真将继续发挥积极作用。他总结道:“我们会继续使用 COMSOL 多物理场仿真软件将优化的充电模式带入整个电池市场。”❖

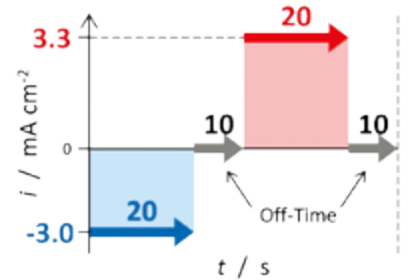


图 4. 通过有限元法对叠片式电池进行仿真,确定了这种脉冲模式为最佳模式。在优化的充电模式下,枝晶中锂的溶解变得更加容易,而沉积则变得困难。图注:Off-Time - 间隔时间



Jusuke Shimura 博士是村田制作所的一名研发工程师。

# 新型半导体功率器件的热管理

中电芯谷的研究人员使用多物理场仿真技术,对新一代半导体功率器件的散热进行了仿真分析,期望提升芯片的散热能力来改进大功率器件的性能。

作者 **RU JIA**

随着半导体技术的高速发展,功率器件的性能需要不断提升,以满足新一代电子产品对高频大功率器件的要求。目前,多数大功率器件是基于硅(Si)和砷化镓(GaAs)等材料制成的晶体管,然而受输出功率和散热性能的限制,此类晶体管难以在高频领域满足大功率、高可靠性电子产品日益增长的需求。

与传统半导体器件相比,基于新一代半导体材料氮化镓(GaN)的功率器件具有高频、超宽频及高输出功率等显著优势,在未来的通信领域有着广阔的应用前景。然而器件在大功率工作时会产生热量,随着热量的不断累积,芯片的温度会升高,致使器件的输出功率大幅衰减,无法充分发挥器件的性能。芯片级的高效散热技术因此成为了半导体领域的研究热点。

受 GaN 器件衬底和外延材料导热能力所限,传统封装级散热技术无法在器件大功率运行时有效提升散热性能,因此需要从器件内部入手改进 GaN 器件的热管理能力。南京中电芯谷高频器件产业技术研究院(简称中电芯谷)隶属于中国大型电子器件研究机构南京电子器件研究所。中电芯谷的研究团队通过深入了解功率器件在工作时的三维热分布及热传递机理,改进功率器件的设

计,提升器件的热管理能力。

## ⇒ 功率器件的热特性

当半导体器件在大功率下工作时,器件内部产生的热量会导致结温(半导体芯片中 P-N 结的温度)升高。虽然 GaN 材料相较于传统的 Si 和 GaAs 材料能够承受更高的极限工作温度,然而 GaN 半导体器件的输出功率却会因为结温的升高而下降。温度越高,器件性能的衰减速度就越快,导致 GaN 功率器件无法充分发挥其大功率性能优势。功率器件的散热问题已经成为限制这一技术应用的瓶颈。

传统的芯片热性能测试实验难以准确评估功率器件芯片区的热特性和散热能力。研究人员通常采用拉曼散射法和红外热成像法等非接触式温度测量技术进行器件温度的测量和分析。这些测量技术难以对影响器件散热的因素进行有效分析,并且无法测量器件内部的结温变化。中电芯谷的研究人员希望利用多物理场仿真技

术,对功率器件的热性能以及影响器件散热的各种因素进行研究。

## ⇒ 多尺度散热的建模分析

在一般的 GaN 功率器件中,功耗集中区(也称为热源区,图 1 中的红色区域),只占整个半导体芯片体积中极小的一部分。由于散热过程中材料晶格的热效应、器件热沉的散热,以及外部空气对器件散热的影响涉及不同尺度下的电学、半导体、传热以及流体等多种物理效应,研究人员在进行了多方面的评估后,最终选择了 COMSOL 多物理场仿真软件对器件的整体散热过程进行模拟分析。

研究团队以实际生产中的 GaN 功率器件为样品,使用 COMSOL 多物理场仿真软件对器件建立了仿真模型,其中包含器件的各种物理原型结构,包括铝镓氮(AlGaN)势垒层、GaN 过渡层、GaN/SiC 热阻界面层及碳化硅(SiC)衬底层,如图 2(A)所示。芯片通过焊料焊接在热

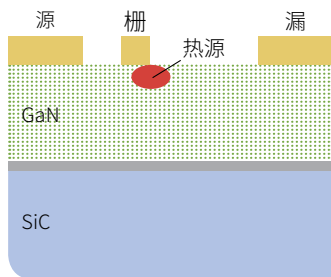


图 1. GaN 功率器件截面结构示意图。

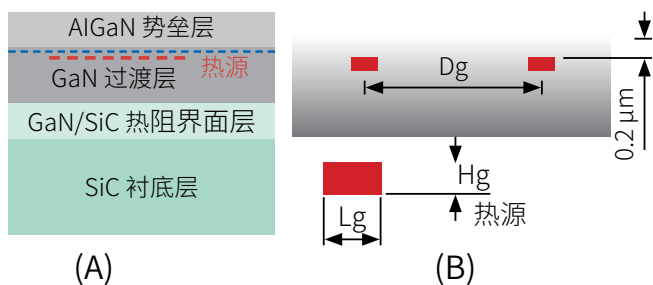


图 2. (A) GaN 功率器件模型截面的结构示意图; (B) GaN 功率器件电热耦合的热源设计:  $L_g=0.5 \mu\text{m}$ ,  $H_g=0.2 \mu\text{m}$ ,  $D_g=22 \mu\text{m}$ 。



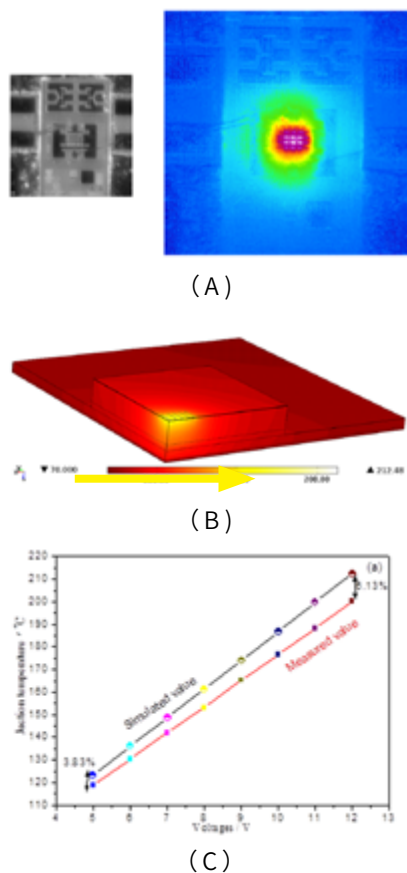


图 3. 氮化镓半导体芯片；芯片的红外测量及仿真结果。图注: Simulated Value - 模拟值; Measured Value - 测量值; Junction temperature - 结温; Voltages - 电压

沉上。对于以 SiC 为衬底的 GaN 器件来说, 器件工作时热源区产生的热量主要通过芯片内部的 GaN 外延层和 SiC 衬底层传递至芯片封装的热沉上进行耗散。由于半导体结构微观尺度下的复杂性, 模型通过在栅结构下添加热源的方式来表征电子气产生的功率热效应, 如图 2 (B) 所示。鉴于热沉和芯片外延层的厚度远大于其他尺寸, 其厚度在模拟过程中采用软件中的无限元方法进行处理。

研究团队依据上述物理结构建立三维仿真模型, 对不同的模型边界条件、材料晶格热效应、器件结构尺寸, 以及自然对流散热等影响因素进行了理论分析。考虑到模

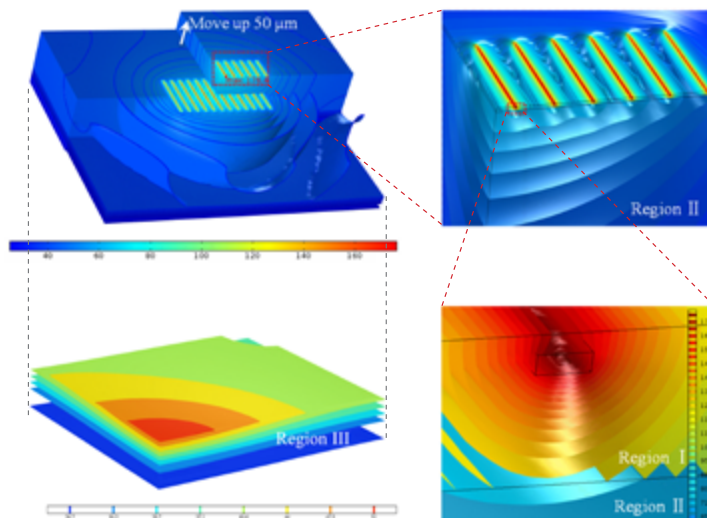


图 4. GaN 功率器件各功能层的热分布情况。图注: Move up - 上移; Region - 区域

型结构的对称性, 在计算时仅需对模型结构的四分之一进行有限元分析。这样可以在保证计算准确性的同时有效减少所需的计算资源, 缩短计算时间。研究人员通过多物理场仿真耦合各种物理现象, 快速分析不同物理量及物理假设对器件散热模型的影响, 借此可以对器件进行新技术开发、热设计优化以及热测试等。

### ⇒ 深入理解功率器件散热

为了进一步深入理解各部件和外部条件对器件散热的影响, 研究人员采用了红外热成像技术对氮化镓芯片[图 3 (A)]在 5V~12V 工作电压下的温度进行了实际测量, 并将测量结果与仿真结果[图 3 (B)]进行了对比。结果显示[图 3 (C)], 在考虑芯片的材料晶格热效应、热沉的温度和尺寸变化, 以及空气的自然对流换热等因素后, 在测试范围内的仿真结果和测量结果高度吻合。

基于准确的多物理场仿真模型和对 GaN 器件散热的深入理解, 研究团队进一步分析了功率器件的热分布情况, 以了解各结构功能层的传热途径。通过使用

COMSOL 多物理场仿真软件计算芯片的热量传输, 得到了 GaN 器件的温度分布和各功能层的热通量, 如图 4 所示。

### ⇒ 优化功率器件热管理

通过对热源区域传热形式的研究, 研究人员分析了热量的三维梯度分布。通过研究界面热阻对器件散热能力及功能结构的影响, 以及衬底厚度对器件散热能力的影响, 优化了器件的结构和整体散热能力。仿真结果显示, 优化后功率器件的结温由 133 °C 降至 112 °C。

中电芯谷的研究团队通过构建 GaN 功率器件的三维热仿真模型, 深入理解了不同因素对器件散热的影响, 为功率器件的热管理优化提供了极大帮助。团队成员郭怀新博士表示: “在解决功率器件热管理这一问题上, COMSOL 多物理场仿真软件中强大的多物理场分析能力具有传统热测试不可比拟的优势, 解决了研究过程中所遇到的各类问题。”借助多物理场仿真技术, 团队已经可以将集成高热导率材料和微流冷却散热等不同的芯片级热管理技术加入到功率器件的设计中。❖

# 多物理场仿真技术提升建筑效率和安全

随着建筑业的快速发展,超高层和大体量建筑工程项目经常会在施工中面临难题。中建八局应用COMSOL多物理场仿真软件改进施工工艺,为施工方案的优化及实施提供了帮助。

作者 HAIJIANG SHI

混凝土是建筑施工中最常见的材料。在传统施工中,泵车将混凝土运送到建筑物模具中直至塑化,浇筑和固化过程耗时较长并且会影响建筑的整体质量。通过不同工艺提升混凝土浇筑的效率和质量成为建筑行业研究的热点问题。中国建筑第八工程局有限公司(简称中建八局)在混凝土浇筑施工技术上进行创新,借助多物理场仿真技术提升水泥浇筑的速度和质量,有效提升了施工进度。

中建八局隶属于中国建筑股份公司的国有大型建筑企业,已相继承建了国内外诸多大型标志性建筑,其中包括中国国家疾病预防控制中心、上海佘山深坑酒店(首图)、天津周大福金融中心、马来西亚标志塔等工程项目。

## ⇒ 混凝土特性仿真

溜管法浇筑是利用重力直接将混凝土

运送至浇筑面的一种施工方法(图1)。与传统的泵车和固定泵浇筑方法相比,该方法更加绿色环保,可实现混凝土输送过程的低噪声、低能耗。溜管浇筑大体积混凝土的方法已经在建筑施工领域得到广泛应用,但该方法在使用过程中仍然存在浇筑方向单一、浇筑速度慢等问题,影响施工效率。

中建八局在工程项目中首创了应用大口径溜管进行快速浇筑的新技术,可以大幅提升混凝土的浇筑速度。中建八局的工程师希望通过仿真技术在正式施工前能够对施工方案进行评估和优化。由于这个过程涉及流体、传热、力学、以及水化反应等多种物理现象,统一的软件平台将会为工程设计人员带来便利,工程师王进博士最终选择了COMSOL®多物理场仿真软件。他表示:“溜管法浇筑混凝土涉及多个物理过程,COMSOL多物理场仿真软件可以让我们在同一平台上研究浇筑过程的不同

阶段。”

与常见的液体不同,混凝土具有复杂的流变特性,且会受到不同混合工艺的影响。混凝土填充到模具中且不降低其质量的能力被称为“可使用性”,常用的评估可使用性的指标是坍落度。在实施溜管法浇筑的过程中,混凝土可能会在管道中出现离析和堵管情况,所以在施工前要进行坍落度实验来控制混凝土的工艺质量。坍落度实验是用一个喇叭状的桶,灌入一定配比的混凝土进行填充,均匀捣实后抹平。拔起桶后,混凝土因自重产生坍落,用桶高(即混凝土的初始高度)减去坍落后混凝土最高点的高度值,就是坍落度值(图2上)。该实验可作为基准模型,为仿真分析混凝土的特性提供参考基准。王进博士使用COMSOL软件的CFD模块中预置的水平集方法两相流物理场接口,创建了一个基准模型,通过将计算得到的锥体坍落过程及宽度和高度等的变



图1. 溜管法浇筑混凝土施工现场。

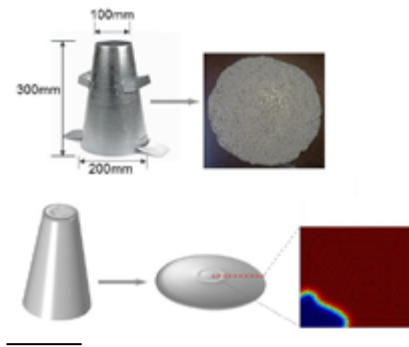


图2. 坍落度实验效果图。实验前后的混凝土(上);建模和仿真结果(下)。

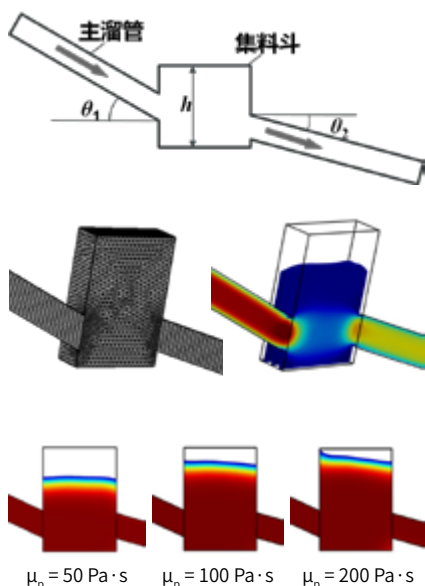


图 3. 改变仿真模型中的塑性黏度得到的流速和体积分数变化， $\mu_p$  表示塑性黏度。

化与实验进行验证(图 2 下), 获得了合理的流变学模型参数。

通过仿真分析可以得出混凝土流变学参数与现场质量控制实验参数的对应关系, 数值仿真结果能很好地吻合实验结果。基准模型确定的这些混凝土流变学参数可用于对后续现场施工时的质量控制进行建模。

### ⇒ 溜管法浇筑混凝土的仿真优化

混凝土通过溜管和集料斗进行浇筑。在多数情况下, 溜管的形状和尺寸固定。当管道的角度不合适时, 混凝土可能在管道内堵

塞或离析, 影响工程进度和质量。在实际施工中可以通过控制溜管的倾角和集料斗的高度来调整混凝土的浇筑过程。

通过在 COMSOL 多物理场仿真软件中对固定高度的集料斗进行三维仿真(图 3), 王进博士计算了不同溜管倾角下混凝土在管道内的流速和在集料斗内的体积变化, 并比较了具有不同塑性黏度的混凝土在管道和集料斗内的流动状态。对溜管不同的入口和出口倾角进行仿真分析后, 王进博士可以依据工程现场的实际情况确定主溜管的最佳角度, 并优化集料斗的高度, 实现对混凝土工艺质量的现场控制。

### ⇒ 提升大体积混凝土施工质量

混凝土在水化反应中逐渐硬化, 同时释放出热量导致混凝土温度升高, 随后在冷却过程中收缩。当混凝土由于受热膨胀或冷却收缩而产生超出混凝土承载极限的应力时, 会发生开裂。大体积混凝土由于混凝土的使用量大, 因此对施工的要求十分高。在施工过程中必须严格控制温度变化, 防止出现裂缝, 否则将影响建筑物的整体强度。设计优化的一个重要目的是控制水化过程的最高温度和内外温差。

建筑工程中由于涉及尺寸较大, 现场工况复杂, 通过实验来进行优化设计的成本很高, 实现难度也很大。在制定大

体积混凝土施工方案时, 中建八局首先对混凝土材料进行温升实验, 然后使用 COMSOL 多物理场仿真软件创建了包含水化反应热的三维固体传热模型, 并使用预置的插值函数调用由温升实验获得的参数曲线。通过足尺实验对模型进行适当修正(图 4), 由此获得最佳的施工方案。

王进博士在 COMSOL 多物理场仿真软件中建立三维水化热模型, 模拟实际的混凝土水化度和温度随时间的变化。他总结道:“通过对不同混凝土水化热模型和大体积混凝土早期温度变化的仿真, 能够给大体积混凝土相关的设计和施工方案优化提供依据。”他表示, 通过更多的实验数据可以修正模型, 以及通过与湿度场、应变场的耦合, 可以建立可靠的混凝土早期变形预测模型。

在工程现场, 有时对参数进行微小的修改就能极大提高建筑效率。为了能将仿真分析的结果用于施工现场, 根据现场需求, 王进博士正在使用 COMSOL 提供的基于仿真模型开发定制的仿真 App, 供现场工程人员使用。比如溜管优化 App, 现场工程师即使没有流体相关的仿真经验, 也只需在简洁的界面上输入几个夹角参数, 点击“计算”即可得到对应的混凝土流动仿真结果, 从而可以确认现场控制参数是否符合施工要求, 快速获得最优的施工方案。

### ⇒ 结束语

COMSOL 多物理场仿真软件在溜管法浇筑混凝土施工方案优化过程中发挥了重要的作用, 不仅提高了中建八局的核心技术竞争力, 也为建筑行业在今后施工优化中对仿真技术的应用提供了借鉴。中建八局已经将该方法成功应用于成都天府国际机场、埃及开罗塔等建筑项目中。❖

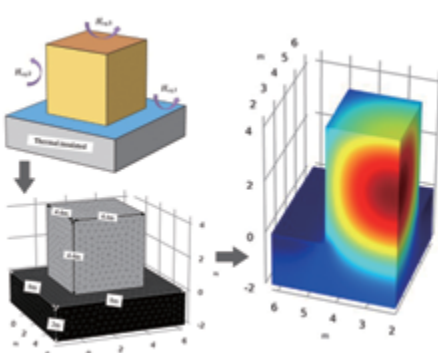


图 4. 足尺寸模型和 COMSOL 仿真结果。

# 合作是个性化医疗的关键

作者 **DAVID ENFRUN, KEJAKO 首席执行官兼联合创始人**

在医疗技术领域，我们致力于通过创新的解决方案改善患者的日常生活，从而提高人们的生活质量。从产品开发到满足患者的实际定制化需求，再到产品市场调查，仿真都起到了一定的作用。仿真应用迟早会成为医疗技术行业标准流程中不可或缺的一环。

在研发部门中，无论是使用仿真对现有解决方案进行逆向工程，还是测试新产品在不同场景下的性能表现，我们的工作总是从物理建模开始。仿真的目的是在产品开发过程中模拟所有必需的产品特性，以便在原型设计和体内试验之前完成计算机概念验证。仿真是我们确保产品性能和安全性的重要保证。我们的经验证明，短短数小时的数值仿真，其价值相当于数年的开发工作。当模型足够准确时，就可以大幅缩短原型设计的时间。

“很明显，COMSOL 预见了很多物理场仿真的强大能力，从而引入了用于开发仿真 App 的‘App 开发器’。有了仿真 App，其他部门的同事可以根据他们的特定需求测试不同的配置，从而确定最佳设计。”

数值仿真除了能够在研发部门发挥作用，还可以成为个性化医疗的有力工具。现阶段，成像和诊断技术已经高度发展。未来，生物信息可以被输入到模型中，模型的计算结果可以提供诊断意见，帮助医生制定一个可实施的医治方案。个性化医疗的发展能够通过创新改变人们的生活。

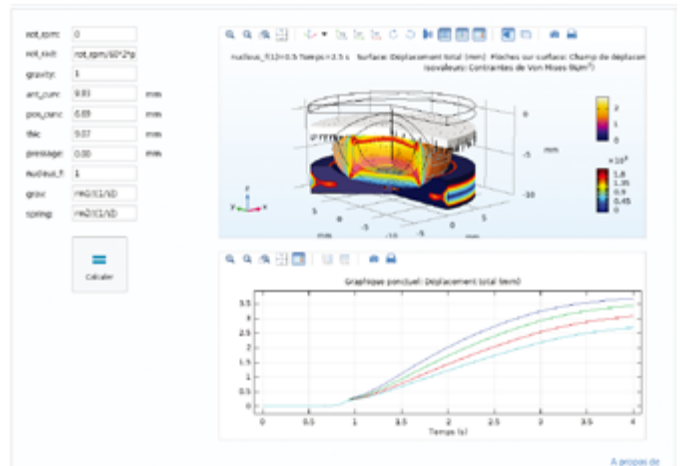
很明显，COMSOL 预见了很多物理场仿真的强大能力，从而引入了用于开发仿真 App 的“App 开发器”。有了仿真 App，其他部门的同事可以根据他们的特定需求测试不同的配置，从而确定最佳设计。

借助仿真 App，我们能够在公司内部加强合作。从研发的角度看，我们可以通过仿真 App 为特定的群体提供仅与他们相关的

参数供其使用，因为模型和物理参数都可以受到保护，这是一项非常有用的功能。这样就可以让所有部门都能受益于多物理场仿真。通过此类合作，我们可以将模型扩展为物理基准模型，并根据用户的需求在模型中调整相应的功能。

此外，仿真 App 还可能在医护人员的工作流程中引入多物理场分析。这项技术将为他们提供更全面的诊断，使他们的定制化治疗能力达到新的高度。

作为 Kejako 公司的首席执行官，我对医学的未来和即将到来的医疗变革充满期待，仿真技术和医疗技术的结合，将有力推动医疗行业的创新和发展！



参数化 3D 眼睛仿真 App，用于临床环境的物理基准测试。



## 作者简介

David Enfrun 在法国国立高等工程技术学院获理科硕士学位，是 Kejako 公司的联合创始人兼首席执行官。David 在医疗器械行业拥有超过 20 年的经验，具有眼科和心脏病学方面的经验。他致力于为 Kejako 公司制定发展方向以及寻找合适的合作伙伴，包括将仿真引入个性化眼科医疗领域。