

# COMSOL NEWS

多物理场仿真杂志

制作美味的膨化食品  
康奈尔大学

P 7

马恒达摩托车的轰鸣声

P 14

Xi 工程咨询公司和华威音频技术公司

## 联手打造定制化 Hi-Fi 级换能器

P 4

# 借助定制化仿真 App 应对设计挑战

当今，随着产品复杂程度的与日俱增，设计人员们正面临着前所未有的挑战，每一项成功设计方案背后都离不开企业内各部门的通力合作。

本年度的《COMSOL News》正是以此为主题，深入探讨了通过加强公司各部门间的合作，帮助设计团队更快地确定理想的设计方案。然而，如何实现这一点呢？越来越多的仿真专业人员选择使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发定制化的仿真 App，并通过 COMSOL Server™ 产品对 App 进行部署。企业可以根据自身的具体需求开发案例库，制造部门和销售部门的工程师可以从中轻松获取高精度的多物理场仿真结果。即使是不具备专业数学建模知识的用户，也能自如地运用软件内置的强大计算工具。他们能够对影响产品外观和功能的参数进行测试，还可以基于自身的专业技能和用户反馈对设计方案提出修改意见。

仿真 App 的出现让产品流程突破了部门的限制，变得更加简洁流畅、开放包容。越来越多的用户也因此受益于数学建模和数值仿真的强大功能，这极大地提升了组织内的协作能力，为设计工作铺平了道路。在这本杂志中，您将了解 Xi 工程咨询公司 (Xi Engineering) 和华威音频技术公司 (WAT) 合作设计的 Hi-Fi 级换能器、马恒达摩托车公司 (Mahindra Two Wheelers) 的摩托车开发进程，以及康奈尔大学 (Cornell University) 的食品科学课程。请一起加入 COMSOL® 软件的体验之旅，希望它能激发您的设计灵感、成就您的最佳设计！

祝您阅读愉快！



Valerio Marra  
COMSOL 公司市场总监

## 参与 COMSOL 社区互动



COMSOL-China



COMSOL 中国

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

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

期待您对《COMSOL News》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**  
2017

© 2017 COMSOL. 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，亦不为其正式认可、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)。

微信微博版权所有：腾讯 Copyright © 2012-2017 Tencent. All Rights Reserved.  
微博微标版权所有：新浪 Copyright © 1996-2017 SINA. All Rights Reserved.

# 目录

## 高精度换能器

- 4 | 演绎最动听的旋律：当新型换能器遇见静电耳机



## 食品加工

- 7 | 制作美味的膨化食品

## 电气设备

- 11 | 仿真 App 加速定制电容器的设计进程

## 汽车工业

- 14 | 马恒达摩托车轰鸣声背后的仿真分析

## 触摸屏制造

- 17 | 仿真 App 优化电子设备保护屏的生产工艺

## 热管理

- 20 | 通过部署仿真 App 提升销售业绩，巩固客户关系

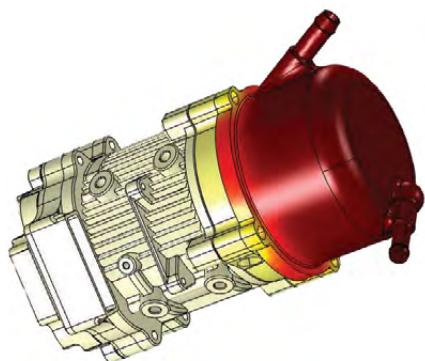


## 封面图片

HP-EL (高精度静电层压板) 超高性能头戴式耳机和全集成音频驱动系统。图片来源：华威音频科技公司。

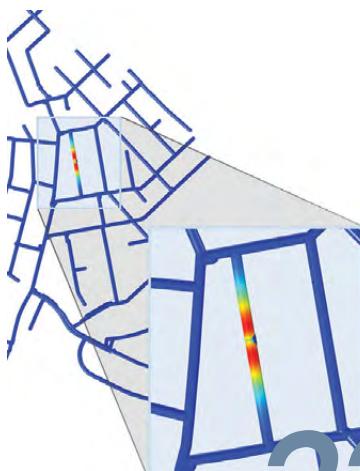
# 专题文章

- 22 | **声学无损检测技术**  
多物理场分析助力地下给水管道的泄漏检测

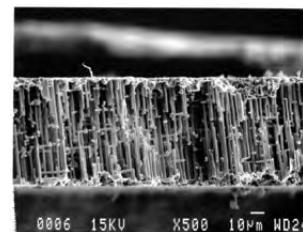


14

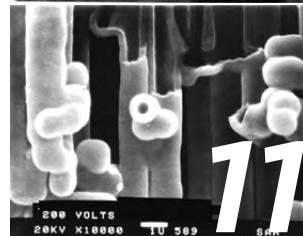
- 25 | **多物理场仿真**  
利用虚拟样机改进电子液压助力转向系统



- 28 | **电池系统**  
加工过程中的热量会损坏电池吗?



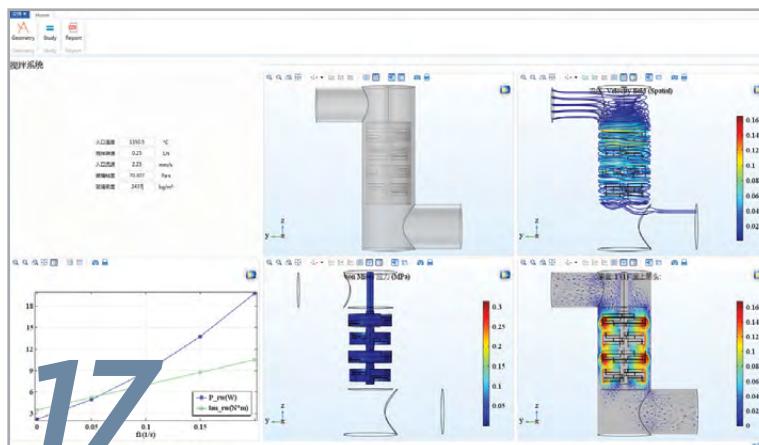
- 30 | **高级声学元件**  
站在助听器研究领域的前沿



- 33 | **航天器充电**  
找出卫星系统中的电弧区域

22

- 36 | **特约评论**  
仿真为医疗器械行业带来变革



17

11

# 演绎最动听的旋律： 当新型换能器 遇见静电耳机

一家音频技术领域的创业公司研发出了一款用于高端静电耳机的新型换能器，可大幅提升耳机的性能表现。

作者 **JENNIFER HAND**



静电耳机以其极致的音质表现，吸引了众多 Hi-Fi 发烧友的关注。相比于其他类型的耳机，静电耳机的清晰度高、总谐波失真小、频率范围大，因此在输出高解析度音源时，声音更加纯净自然，轻盈饱满。

大多数静电扬声器的工作原理是：在两块导电板之间的弹性薄膜上积累电荷，当输入电信号时，带电薄膜便会随之振动并产生声波。声波进入耳朵后，最终经过大脑的复杂处理变成了能为我们带来欢笑和泪水的动人音乐。

尽管静电扬声器的音质和还原度均无可挑剔，但其缺点在于售价过高，且容易损坏。由于此类扬声器对机械加工精度的要求极为严苛，因此直到最近其生产仍然依靠纯手工制作。为了满足市场对价格适中、制造难度较低的高品质耳机的需求，英国华威大学 (Warwick University) 的附属公司华威音频技术有限公司 (Warwick Audio Technologies Limited, 以下简称 WAT) 设计了一款高精度静电层压材料 (High-Precision Electrostatic Laminate, 简称 HPEL) 换能器。此项专利技术的创新性在于换能器是由一张极薄的振膜和一块 (而非一对) 导电板构成的。目前，WAT 已研发出了厚度仅为 0.7 mm 的层压薄膜，可与静电耳机完美契合。

新型 HPEL 的轻量薄膜结构由连续轧制工艺制备而成。“我们开发的这项技

术堪称独一无二，” WAT 的 CEO Martin Roberts 解释道，“HPEL 换能器的组成部分包括由金属化聚丙烯薄膜、带六边形单元的聚合物衬垫，以及导电网。” (图 1)

在传统的扬声器中，直流电 (DC) 被施加于弹性膜上，交流电 (AC) 被施加于膜两侧的导电板上。与之不同的是，在 WAT 的单面扬声器中，直流电虽然依旧被施加于弹性膜上，而交流电信号则被施加在了紧贴振膜的单层金属网上。

得益于上述加工方案，WAT 的换能器制造成本远低于传统静电扬声器中的换能器。这一突破性的进展意味着静电扬声器有望被应用于高品质的音频设备中，这也是静电学首次展现出其潜在的商业价值。

## ⇒ 模拟声音回放

为了在不影响音质的前提下，大幅降低加工难度和成本，WAT 的研发团队在确定最终设计方案之前，全面考察了会对整体方案产生影响的多个设计元素。“我们虽然开发出了许多能达到设计预期的物

理样机，然而最大的问题在于，我们无法确定在改变某种材料和多个设计参数后，会给换能器的性能带来怎样的影响。” Roberts 回忆道。

HPEL 的动力学性能受制于各设计参数间极为复杂的相互作用，这些参数

“过去，我们每周都不得不亲手制作多个产品样机；而现在我们只需在软件中进行简单的调试，便能获得令人满意的设计成果。此外，我们还能够方便地根据客户的个性化需求对换能器进行定制。”

— MARTIN ROBERTS, 华威音频技术公司 CEO

包括振膜张力、交流信号电平、扬声器的几何结构、材料的弹性和介电属性、热粘性声损耗，以及靠近振膜开口侧由空气引起的辐射声质量。设计人员希望通过减少低频滚降、降低失真，并最大限度地提升在给定信号输入下的声压级，从而改进设备的低音表现力。然而，他们无奈地发现，任何组件的细微变化都会对声音的输出造成不可忽视的影响。

尽管 WAT 拥有不少机械、电子和声学领域的专家，但由于公司自身不具备仿真分析能力，因而难以深入了解各因素间的相互作用。为了对 HPEL 换能器的设计进行仿真优化，WAT 向 Xi 工程咨询公司寻求了帮助。Xi 工程咨询公司是 COMSOL 的认证咨询机构，专门从事计算建模、设计咨询、解决机械的噪音和振动问题，以



图 1. 从上至下依次为:WAT 研发的 HPEL 换能器, HPEL 换能器成品的层压材料、装配图, 以及分解图。所有层压材料均为英国制造。

及其他技术服务。

Xi 工程咨询公司的技术总监 Brett Marmo 博士领导的研究团队使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发了仿真模型, 并基于模型对 HPEL 的性能表现进行了分析。在对 HPEL 的不对称设计进行修正时, 会引起多种非线性效应。借助

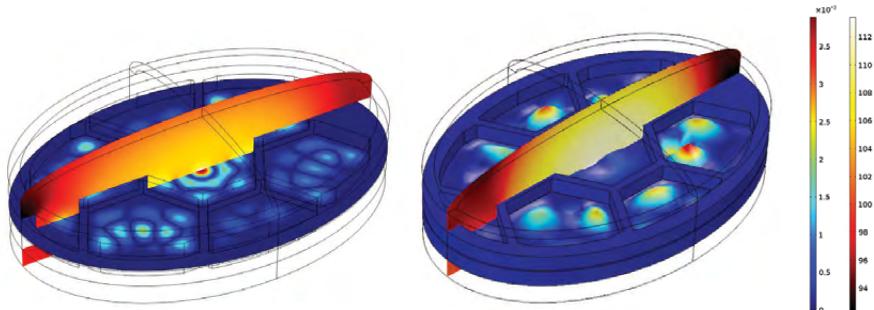


图 2. 如仿真结果图所示, 通过在频域内求解声学 & MEMS 的全耦合模型, 开发团队获得了声压级 (单位为 dB, 热度颜色表面图) 和振膜的位移 (单位为 mm, 彩虹颜色表面图)。左图: 频率为 5000 Hz 时的求解结果; 右图: 频率为 5250 Hz 时的求解结果。

COMSOL® 软件, Xi 工程咨询公司可以对这些非线性效应进行模拟。

“我们将初始模型设置得十分简单, 从而可以将更多的注意力放在那些会影响声音质量的特性上。举例来说, 为了研究 HPEL 在低频下的性能表现, 以及声-结构相互作用, 我们最大限度地降低了一阶谐波的频率。” Marmo 在描述初步试验时解释道, “我们的模型显示了外加电压对信号电平的影响, 这帮助我们理解了声音失真的初始状态。”

由于换能器只使用了一块导电板, 因此静电力会随着振膜位置的变化而发生变化, 即与振膜和网间距的平方成反比。只要 WAT 的工程师了解了由振膜位置变化引起的非线性失真, 并能预测其影响, 便可通过电信号消除与之相关的失真。

### ⇒ 完善 HPEL 换能器的设计

随后, Marmo 在更为全面的仿真模型中耦合了结构-MEMS-声学现象。他通过模型检验了不同参数带来的影响, 这些参数包括金属丝网中六边形单元的尺寸、金属网层的厚度、振膜张力、振膜与网层的距离以及各个元件的材料属性。此外, 由于直流偏压是低频失真的常见原因, Marmo 和同事们还研究了不同直流偏压造成的影响。他们分析了导电板的电导率, 用于辨别板上不同区域的电压是否相同。随后, Marmo 的团队使用 COMSOL 对热粘

性声损耗进行了研究, 并模拟了振膜在不同频率下的位移 (图 2)。

Marmo 评论道: “事实告诉我们, 只有这样的仿真分析才能真正准确地对平面静电换能器进行模拟。在这个项目中, 我们可以通过集总参数建模对耳机特定方面的性能进行分析, 例如低频幅值响应。一个在某些情况下十分合适的参数, 但有可能引起其他方面的严重失真。多物理场建模包含了影响人类对声音感知的所有维度, 包括时域响应和非线性失真。”

自从引入了多物理场仿真, WAT 的工程师便能实时调整设计参数, 进而优化组件的整体性能。他们成功地预测了引起频率响应中尖峰的原因, 并对信号进行平滑处理, 从而使装置具有更高的保真度。

“仿真分析帮助我们节省了大量的费用和时间,” Roberts 说道, “过去, 我们每周都不得不亲手制作多个产品样机; 而现在我们只需在软件中进行简单的调试, 便能获得令人满意的设计成果。此外, 我们还能够方便地根据客户的个性化需求对换能器进行定制。”

Marmo 的研究团队将 WAT 设计团队提供的物理测量值相应的仿真结果进行了比较。“仿真结果与物理测量结果惊人地一致。” WAT 公司的 CTO Dan Anagnos 评论道, “亲眼看见仿真模型变成现实, 并且

能精确地预测扬声器的性能表现，这大概是仿真分析工作最令人激动的地方。”

### ⇒ 仿真 App 赋予用户更大的自由度和灵活性

在验证仿真结果后，WAT 对设计成果十分满意。Xi 工程咨询公司的下一步计划是将后续的仿真分析工作移交给 WAT。借助 COMSOL 软件提供的“App 开发器”工具，Marmo 的团队可以基于仿真模型开发 App，并通过网络对其进行分享与管理。

用户只需在仿真 App 的操作界面中修改相应的输入值，便能对大量参数进行测试，其中包括直流偏压、交流信号电平、频率范围和解析度、材料属性、扬声器尺寸、金属丝网的形状和尺寸，以及衬垫位置等（图 3）。由于用户在使用仿真 App 时无需访问原始模型，因而即便没有学习过软件，也能自如地运行测试。

“仿真 App 为 WAT 省去了购买软件和聘请资深仿真专业人员的开销。” Marmo 说道，“仿真 App 让客户真正地掌控了设计进程，他们可以随心所欲地进行测试，再也不必因为某些细微的调整而反复联系我们。同时，这也让我们的设计团队有了更多的时间和精力去迎接新的挑战。” Xi 工程咨询公司期望在今后的客户咨询工作中更多地使用仿真 App，使其发挥更大的作用。

WAT 也将 App 分享给了自己的客户，方便他们找到与特定的耳机型号匹配的 HPEL 换能器设计。“Xi 工程咨询公司的团队十分出色。他们拥有丰富的专业背景和经验，帮助我们对产品中的复杂问题进行了有效的分析，并一一解决。” Roberts 补充道，“Xi 工程咨询公司团队开发的 App 直观简洁，绝对是一个意外惊喜。我们不用担心任何知识产权的泄露，放心地将产品设计 App 交到客户手中。这样他们可以自行对不同的设计进行测试，从而将这一技术融合在高端的耳机产品中。”

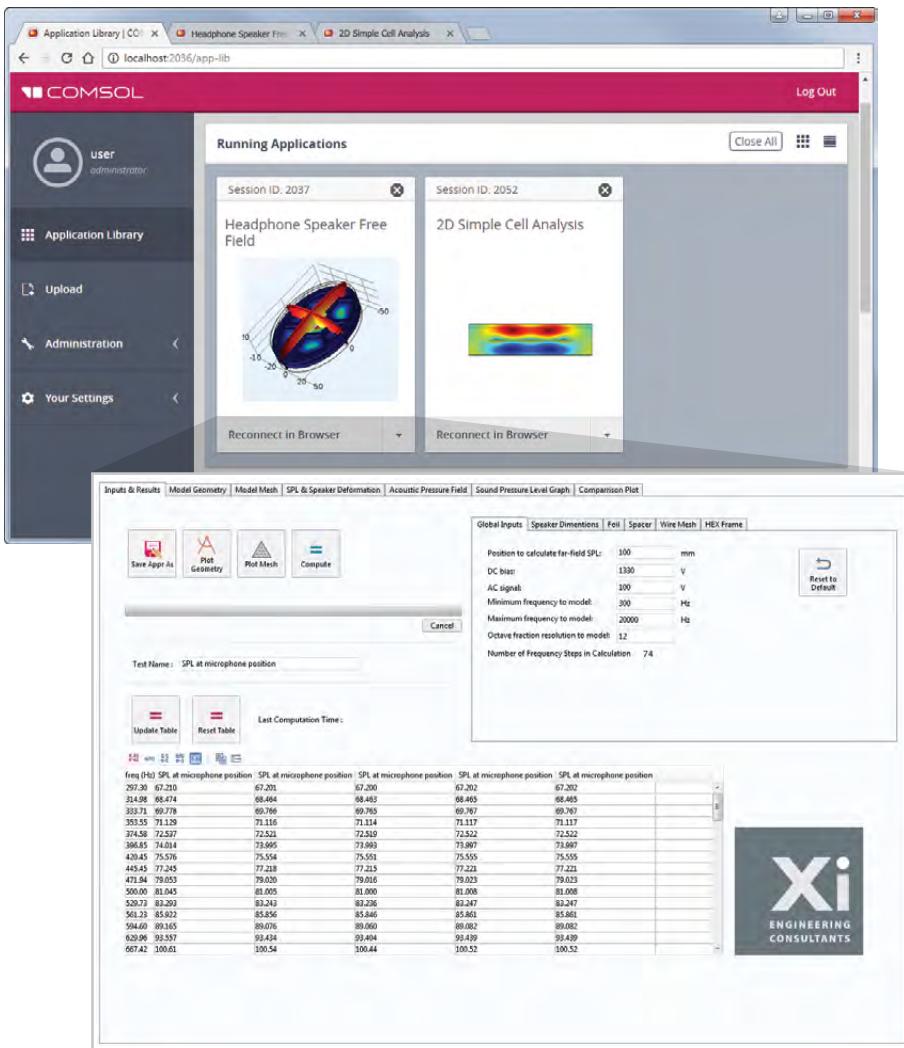


图 3. 前置图：在 Xi 工程咨询公司开发的仿真 App 中，工程师可以修改一系列参数，其中包括频率、电输入、扬声器尺寸，以及振膜、衬垫和金属丝网的属性。数据结果显示了不同实验中的声压级、振膜位移、不同直流偏压的频率响应，并比较了仿真数据与实验结果。后置图：通过 COMSOL Server™ 产品部署仿真 App，方便相关工作人员在网页浏览器中进行访问。



从左到右依次为：Brett Marmo, Xi 工程咨询公司技术总监；Martin Roberts, 华威音频技术公司 CEO；Dan Anagnos, 华威音频技术公司 CTO。

# 制作美味的膨化食品

康奈尔大学的一支研究团队使用数学模型对大米的膨化过程展开了研究, 推动了食品工业的发展。

作者 **LEXI CARVER**

膨化谷物是一种在亚洲的部分地区流行了数个世纪的零食, 这种食品近年来风靡全球, 占据了各大超市货架。相信您一定不会对咀嚼米饼、各种膨化玉米、巧克力威化时发出的那种美妙而清脆的声音感到陌生。

然而另一些不悦的感觉您一定也十分熟悉: 咬一口膨化零食, 却发现它过于柔软、难嚼、干燥, 或者从包装袋中取出时就已经受潮了。那么, 是什么原因导致了这些问题呢?

米粒在膨化时, 其内部究竟发生了什么? 如果您曾观察过这一过程, 就会发现, 米粒升温到一定程度后会突然发生膨爆, 导致形状发生变化, 就像爆米花(图 1)。

米粒的膨化过程涉及了许多物理现象, 包括质量、动量和能量传递间极为复杂的相互作用, 水分快速蒸发, 材料相变, 以及压力积累和塑性变形等。

为了让膨化食品具有令顾客满意的口感, 食品公司花费了大量的时间用于研究如何在膨化食品中保持适当的水分含量,

并最终找到了可靠的加工条件, 能够确保食品受潮只是一个偶然事件。然而, 若要将膨化方法应用于大规模生产, 食品公司还需要对加工工艺进行优化, 使食物在加工后的口感、风味和水分含量保持一致, 在某些情况下, 还需要特别注意食品安全问题。

## ⇒ 探索最佳的加工条件

在获得了美国农业部 (United States Department of Agriculture, 简称 USDA) 农业与粮食研究计划 (Agriculture and Food Research Initiative, 简称 AFRI) 项目的研究资助后, 康奈尔大学针对食品加工过程中, 具有相依赖性的可变形多孔介质的传递过程展开了研究。一支由生物与环境工程学院的 Ashim Datta 教授领导的研究小组, 对蒸谷米 (又称半熟米) 膨化过程中的动力学和材料特性进行了模拟<sup>1</sup>。

想要得到最佳的食物口感, 除了需要分析谷物膨化过程中伴随着的复杂相变、能量传递和力学行为外, 研究人员还需要



图 1. 普通蒸谷米 (上图) 和膨化后的蒸谷米 (下图)。

对盐的预处理、温度和初始水分含量等一系列因素进行全面的研究所。

此项研究工作的核心是建立一种能够适用于多种场景的建模方法。“我们建立了一个框架, 可用于分析食品加工过程中涉及的物理场, 同时这一框架还具有广泛的适用性。例如, 油炸过程中发生的物理现象与烘焙过程不同, 但这些物理现象都能被涵盖在同一个框架内。” Datta 教授解释道。接着, 他又阐述了一个食品行业广为关注的问题, “消费者喜欢油炸食品的口感, 却又不想因此影响健康。也就是说, 需要用其他的方法烹饪出油炸食品所具有的口感。”

“为此, 食品公司正在尝试以烘焙和‘膨爆’代替油炸。他们不断对产品和工艺进行改进。在做出任何改动后, 都必须重新找出新的最佳工艺条件。而我们可以自己开发的框架中自由地更换条件参数, 进而测试不同的工艺流程对食品成品的影响。”

“只要能确定某种加工方法中不同的温度和湿度组合对力学性质的影响, 便能预测是否可以通过其他加工方法制造

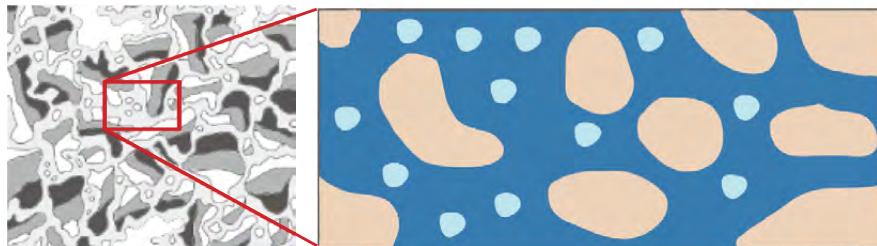


图 2. 将米粒描绘为多孔的弹塑性固体, 其中液态水 (深蓝色) 会发生毛细扩散、对流和相变; 由水蒸气和空气组成的气体 (浅蓝色) 会发生主体流动、二元组分扩散和相变; 由固体淀粉组成的结构骨架 (浅棕色) 会发生大形变。

出具有相同品质的食品。我们想要确定的是，不同的工艺究竟会对食品的口感、含水量、含油量，甚至对人体的健康产生怎样的影响。”

研究团队面临的巨大挑战在于影响食品最终状态的因素实在是太多了。将蒸谷米加热到 200°C 时，液态水将会迅速蒸发，从而导致米粒内的气压升高，并发生相变。米粒从一开始刚性的玻璃态迅速转变成了柔软的、具有一定弹性的橡胶态，进而膨胀成最终形状。在此过程中，加热时间、初始含水量和含盐量也起着决定性的作用。

### ⇒ 模拟相互影响的物理现象

为了解这些因素协同作用的过程，从而找到理想的加工条件，Tushar Gulati (Datta 教授当时的学生) 开展了一项旨在揭开谷物膨胀之谜的研究工作。

他使用 COMSOL Multiphysics® 软件对膨化蒸谷米粒内部的力学、热力学、材料和流体性质进行了分析。

“从数值分析的角度来看，这个问题极具挑战性。” Datta 教授评论道，“为此，我们的团队对多孔介质中的流动、多相输送、固体力学、传热，以及其他涉及电磁特性的情况（例如微波加热）进行了研究。”

Gulati 建立了一个多相的多孔介质模型，用于研究质量和动量的变化、能量的传递以及体积的大幅膨胀。模型分析了固体大米的不同形态，液态水和气态水，以及毛细流动、二元组分扩散和压力驱动流等水分输送方式。他将米粒假设为一种弹性材料，并获取了米粒的机械位移和膨

**“仿真 App 为我们呈现了一种全新的教学方式。在食品安全课程中，App 成为了强大的跨学科学习工具。它让学生可以实际地模拟出许多假想的场景。”**

— ASHIM K. DATTA, 教授  
康奈尔大学

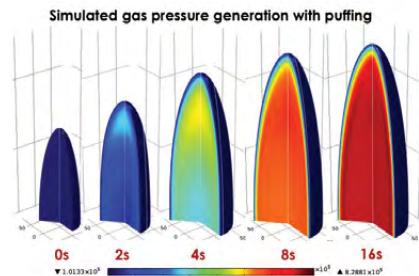
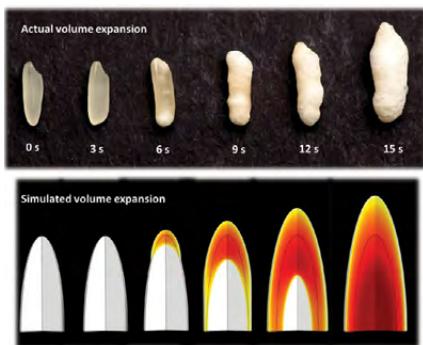


图 3. 左图: 时长为 15 秒的膨胀过程中, 米粒的真实的体积膨胀和模拟体积膨胀的对比; 右图: 仿真结果显示了气体压力的产生过程。

胀这两项数据。

仿真分析的结果显示了米粒膨胀过程中不同阶段的温度、湿度、压力、蒸发率、体积应变、孔隙率和应力水平等参数随空间和时间的分布情况(图 3 和图 4)。

研究团队使用显微 CT 图像重建技术测定了大米的膨胀比, 并对大米微观结构的演化过程进行了可视化处理, 从而验证了计算模型的准确性。在测定工作中, Gulati 还发现膨胀比容易受到蒸发率和固体基质渗透性的影响。

基于上述工作, 研究团队获得了一个全耦合模型, 它涵盖了膨胀过程中包括相变在内的多种不同行为。Gulati 将传递模型与大形变耦合在一起, 测试了不同的盐含量对体积膨胀、蒸发和材料属性的影响。盐会降低玻璃-橡胶态的转变温度, 这意味着加入盐后, 米粒会在较低的温度下更加快地发生膨胀。

Datta 教授补充道: “仿真结果显示了米粒内部各类初始性质, 以及这些性质在加热过程中随时间的变化。这些结

果是无法通过实验测量得到的。模型向我们展示了米粒膨胀、干燥和收缩的完整过程。”

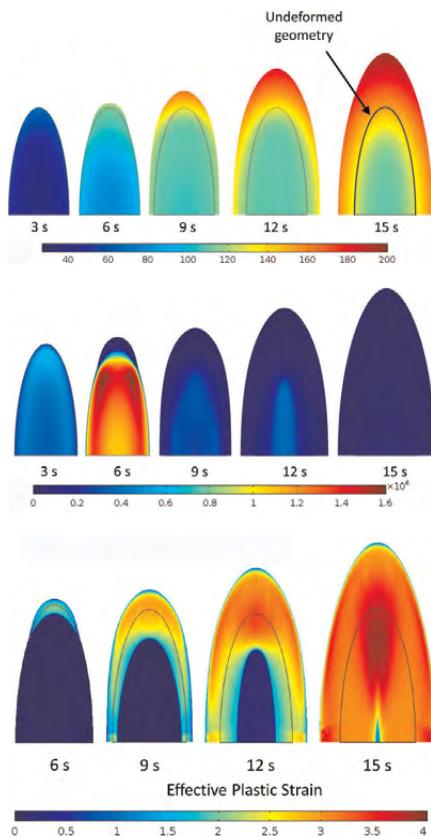


图 4. 膨化过程中的温度(上图, 单位为 °C)、第一主拉伸应力(中图, 单位为 Pa), 以及有效塑性应变(下图)。图注: Undeformed geometry - 变形前的形状; Effective Plastic Strain - 有效塑性应变

另外,模型还帮助我们理解了孔隙的形成过程。如图 5 所示,孔隙最初在米粒两端形成,并逐渐向内部扩展。

研究团队基于仿真结果确定了最佳的使用盐量、水分含量、温度和加热时间,保证每一粒爆米花都拥有最佳的口感。仿真结果同时还表明了达到最大膨胀比所需的条件。

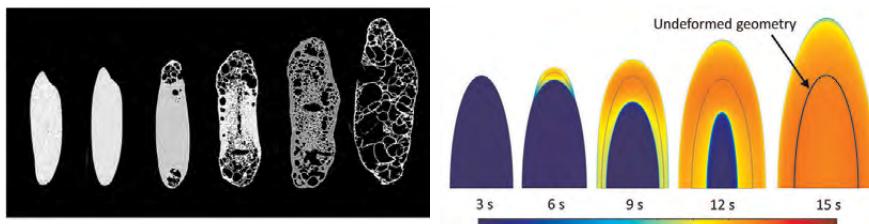


图 5. 左图: 稻米膨化过程中不同阶段的 CT 扫描图。右图: 仿真分析显示了孔隙率的预测结果。

## ⇒ 展望食品工程的未来

除了上文提及的模型框架外, Datta 教授的研究团队还将仿真分析扩展到了食品安全的研究领域。这对于食品公司来说意义深远,因为这些研究可以帮助他们预测食品的健康价值和保质期,并且确保食品加工过程安全卫生。

目前, Datta 教授正在负责另一项由国家食品与农业研究院(隶属于美国农业部)资助的项目。在该项目研究中,他的学生使用 COMSOL 软件建立了仿真模型,并基于模型开发了计算 App,成功地将仿真分析扩展到非工程师群体。康奈尔大学通过 COMSOL Server™ 对 App 进行了大规模部署,学生和教师无需直接购买软件和硬件便能受益于仿真分析带来的优势。

“仿真 App 为我们呈现了一种全新的教学方式。”他评论道,“在食品安全课程中, App 成为了强大的跨学科学习工具。它让学生可以实际地模拟出许多假想的场景。”康奈尔大学开发的仿真 App 目前已被美国的多所大学采用。

Datta 教授的团队还为食品科学家开发了用于研究罐装食品的仿真 App,它能够分析杀菌需要的加热时间与容器尺寸之间的关系(图 6)。使用者可以对温度进行调整,然后计算罐装食物加热到安全温度所需的时间。此外,仿真 App 还能对细菌死亡率进行调整,从而确定最终的产品是否可以让消费者放心食用。

Datta 教授表示,对爆米花的研究仅仅是一个起点。他们可以轻松地现有研究拓展到其他生物材料(例如玉米等),甚至可以是其他全新的应用领域。他补充

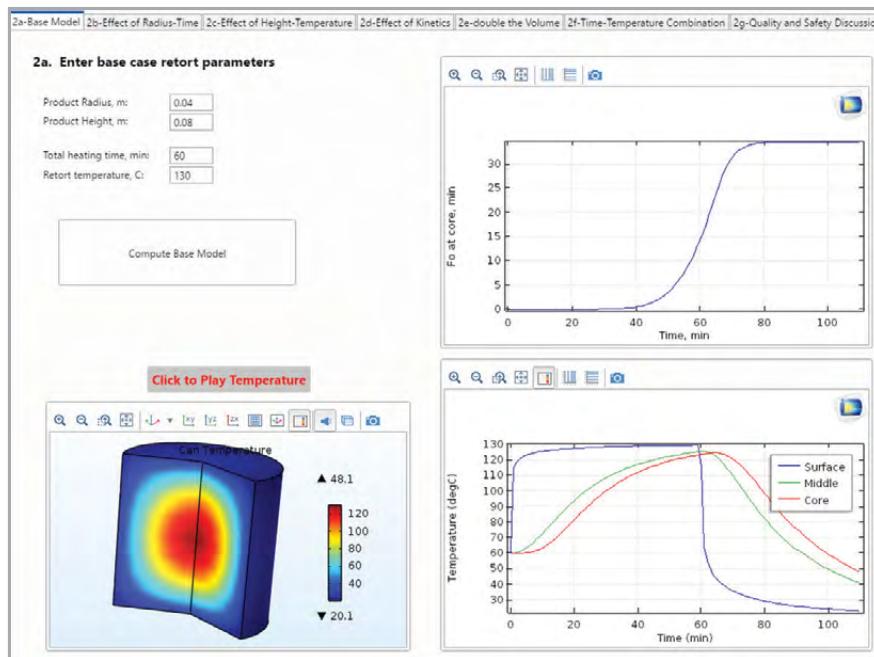


图 6. Datta 教授的学生开发的用于研究罐装食品的计算 App。使用者可以更改罐头尺寸和加热时间等参数。

道:“物理和建模知识对于各行各业都十分有用。我的一个学生后来从事着微波干燥方面的技术研究,而该技术的应用对象是汽车催化转化器。他在研究中采用的仿真技术与本文提到的技术相似。”Datta 教授正在为下一代的工程师们传授基础的物理建模知识,他期待着食品工业能在不久的将来实现重大突破。❖

## 参考文献

1. Gulati, Tushar and Datta, Ashim K. “Coupled multiphase transport, large deformation and phase transition during rice puffing,” *Chemical Engineering Science* 139 (2016) 75–98.



Datta 教授最喜欢的一项工作便是在康奈尔大学教授课程,他会引导学生们使用 COMSOL 对生物医学过程进行模拟。正如文中的爆米花案例所示, COMSOL 软件能够全面地耦合多物理场现象,

因此他将 COMSOL 视为一件强大的教学工具,帮助学生通过仿真深入学习各类生物医学应用中的底层物理原理。

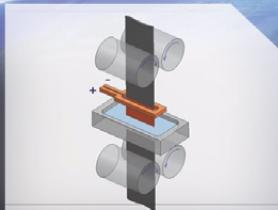
今年, Datta 将在国际建模与仿真学校举办一场研讨会,这是一所短期的国际学校,其前身是一个从事食品工程虚拟仿真研究的兴趣小组。

# CAN YOU DESIGN A BETTER TOMORROW?

THEY DID.



Life-Saving Bacterial Detection



High Performance Armor



Oil Change Transformation



Grab-and-Go Booster Seat

NOW IT'S YOUR TIME TO SHINE!  
ENTER TO WIN \$20,000 GRAND PRIZE  
[createthefuturecontest.com](http://createthefuturecontest.com)

Create  
THE  
Future

DESIGN CONTEST 2017

PRINCIPAL SPONSORS



# 仿真 App 加速定制电容器的设计进程

美国 CDE 公司的工程师们利用仿真 App 对定制化电容器的设计进行了评估和优化。这些仿真 App 让设计和制造部门的工程师们摆脱了复杂计算模型的制约，能够在现场对器件的配置进行快速探索。

作者 SARAH FIELDS

电容器是一种被广泛用于电子设备中的电子元件，其应用范围还包括那些需要在极端条件下工作的设备中。不同的应用领域对电容器的需求各不相同。电容器有时需要符合严格的功率规格，或能在特定的温度范围内工作，甚至有时必须由特定的材料制成。

CDE (Cornell Dubilier Electronics) 公司是全球规模最大的定制化电容器制造商之一，其开发的电容器不仅被应用于风力涡轮机和太阳能等民用设备中，在战斗机和雷达系统等对装置精度要求极为严苛的军事和航天领域的设备中也有着广泛的应用。在定制化电容器的开发工作中，CDE 公司的工程师使用了数学建模和定制化的仿真 App 对电容器的设计进行微调。

CDE 公司的研发主管 Sam Parler 解释道：“通过使用 COMSOL Multiphysics 及



图 1. 铝电解电容器。电解质绕组由铝箔和纤维素隔膜构成，并呈现热各向异性。

其‘App 开发器’工具，我们可以建立高精度的多物理场模型，并基于模型开发仿真 App。这一方式让其他部门的同事能够对不同配置进行自由地测试，从而选定最优设计。”

## ⇒ 何时开始升温

CDE 公司针对不同的应用领域分别设计了包含一个或多个元件的电容器，例如由铝箔和纤维素隔膜组成的电解质绕组、由偏置的金属化介电膜构成的静电绕组、交错叠加的金属箔片，以及云母等电介质（图 1）。

发热现象是电容器设计人员面临的一个重要问题。过多的热量会大幅缩短电容器的寿命。如果电容器的工作温度比最大设计温度值高 6~10 °C，其使用寿命将会减少至原有寿命的一半。当电流通过铝箔绕组时会产生焦耳热，如果忽略这一因素，将无法全面地了解电容器内的热量分布。因此，CDE 公司的工程师希望通过仿真将发热量降至最低水平，并优化装置的散热性能。

为了达到上述目的，设计人员必须对电容器中复杂的材料组成进行精确表征。电容器常常包含多达六种不同的材料，其中部分材料具有各向异性的特征。在某种电容器的设计中，绕组由纤维素隔膜和铝箔构成，并表现出各向异性导热性能，其轴向的导热系数比径向高出两个数量级。

得益于 COMSOL Multiphysics® 的灵活性，Parler 可以直接输入张量形式的导热

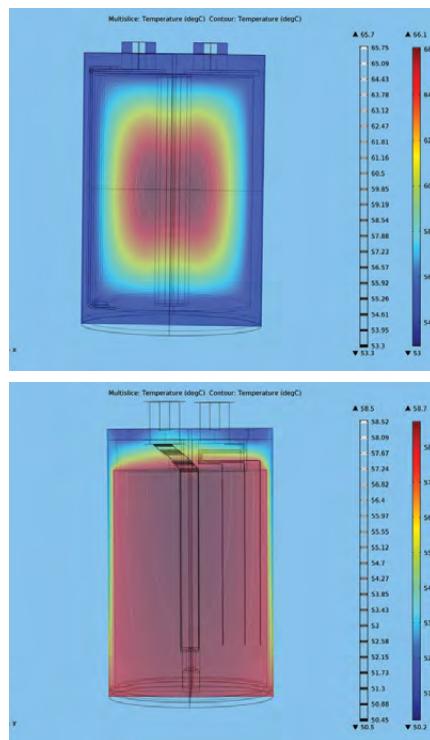


图 2. 对比金属化聚丙烯薄膜电容器（上图）和铝电解电容器（下图）的热分布情况，二者的几何尺寸均近似为 76 mm × 120 mm，并且在 45 °C 环境中均具有 5 W 的耗散功率。

系数，从而获取电容器中准确的热分布。以典型的简单电容为例，可近似地认为沿 z 轴方向的圆柱形电解质绕组的电容张量是正交各向异性的，并将其导热系数设置为 {1,1,100} [W/m/K] 的对角张量形式。

在一次测试中，Parler 采用了两种电力电容器，分别为金属化聚丙烯（塑料）薄膜电容器和铝电解电容器（图 1 和图 2）。这两种电容器的尺寸和额定纹波电流相似，但结构完全不同。

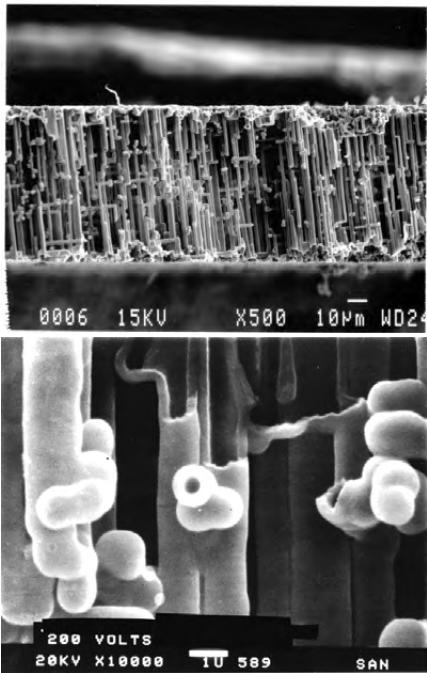


图 3. 大型铝电解电容器的同轴微结构示意图。其中电介质为氧化铝( $Al_2O_3$ )，它通过高度蚀刻铝箔的曲折表面阳极化处理制成。在上图中，氧化铝介电管周围的铝已被溶解。

塑料薄膜电容器(图 2 上)的轴向导热系数比铝电解电容器(图 2 下)低得多。借助多物理场仿真, Parler 可以准确地计算出在给定的耗散功率下, 塑料薄膜电容器将会比铝电解电容器的温度高多少。

### ⇒ 使用形状优化技术揭示微结构

CDE 公司开发的电容器通常是技术创新的产物, 所以在某些情况下, 公司需要自行测量一些前沿材料的阻抗。Parler 曾在设计一款大型铝电解电容器时, 需要对具有复杂微结构的氧化铝( $Al_2O_3$ )电介质的阻抗进行表征。这类电介质是由高度蚀刻的曲折铝箔表面经过阳极化处理后制成的(图 3)。

虽然使用另一款软件来执行零维电路仿真也能再现频率响应, 但是由于其内置的拉普拉斯逆变换算法带有局限性, 并会引起“非因果性”错误, 因此

无法执行瞬态仿真。

利用 COMSOL 软件提供的形状优化技术, Parler 可以为顾客计算出正确的瞬态解。为了通过非线性优化方法找到最佳的几何形状, 他从一个电容孔隙填充有电解质的圆柱形电容孔隙开始模拟, 在开口处施加给定的激励, 并启用了软件中的稀疏非线性优化求解器(sparse nonlinear optimizer solver, 简称 SNOPT)。在求解过程中, 他需要不断调整轴对称孔壁的形状, 直到模型的计算结果与通过实验得到的阻抗数据能够吻合。

图 4 中显示了最终生成的几何图形, 研究人员便能够基于经过验证的数学模型, 开展下一步的设计工作。

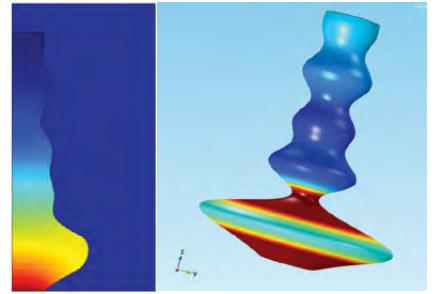


图 4. 针对由介电材料构成的同轴微结构而言, 形状优化技术是获取其电气特性的有效方法之一。上图显示了优化后的微结构。

研究人员便能够基于经过验证的数学模型, 开展下一步的设计工作。

“通过使用 COMSOL Multiphysics 及其‘App 开发器’工具, 我们可以建立高精度的多物理场模型, 并基于模型开发仿真 App。这一方式让其他部门的同事能够对不同配置进行自由地测试, 从而选定最优设计。”

— SAM PARLER, CDE 公司研发主管

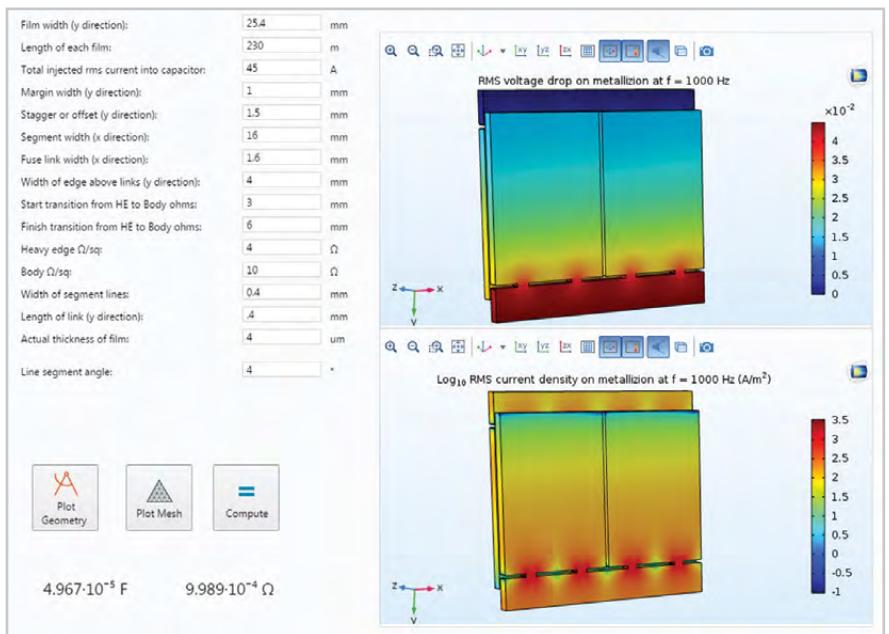


图 5. 用于计算功率薄膜电容器的电容和电阻的设计 App。

## ⇒ 用于电气优化的案例库

在使用 COMSOL 软件创建了用于分析设计方案的模型后，Parler 和团队成员将模型封装成了仿真 App。封装后的仿真 App 能够被自由地部署和分发给设计人员和生产部门，用于协助他们完成设计工作。

在使用仿真 App 进行功率薄膜电容器设计时，设计人员可以在仿真 App 的用户界面中输入相关参数，包括薄膜宽度（通常为几厘米）、薄膜长度、表面电阻和过渡区位置等，进而计算出一段金属薄膜的电容和电阻（图 5）。将仿真结果按比例放大，就能得到整段绕组的电容和电阻数据，从而帮助工程师完成对设计的初步验证。

另一个 App 适用于计算圆柱形电容器中金属薄膜的功率密度，并可对包括接头和端子在内的芯子温度分布进行预测。仿真 App 还分析了纹波电流、环境温度和气流速度等客户需要的工作条件（图 6）。

第三个 App 的作用是计算单接头薄膜电容器的等效串联电感 (effective series inductance, 简称 ESL)（图 7）。使用者可以自由地修改端子的直径、高度、间距、接头宽度、绕组直径和芯子外径等几何参数。底层模型利用了 COMSOL 软件中的频域研究和电磁建模功能。ESL 是各类电容器设计的关键参数，它会直接影响电容器的性能。

## ⇒ 仿真 App 引领制造业的未来

在多物理场仿真的帮助下，Parler 的团队能够准确预测电容器设计的性能，这帮助他们大幅提升了研发效率，同时还确保了产品的可靠性。

借助基于 COMSOL 模型开发出的仿真 App，生产现场的设计人员和工程师可以在简洁的用户界面中调整关键参数，测

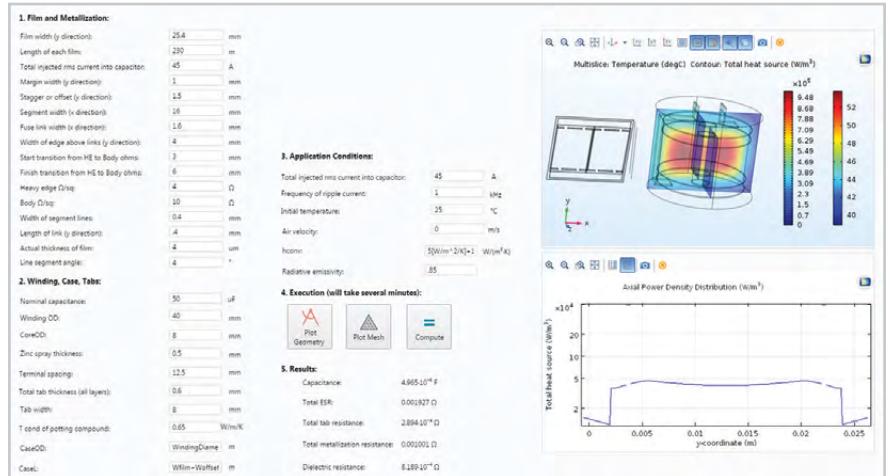


图 6. 此仿真 App 可用于预测带接头和端子的圆柱形电容器内芯子的温度分布和薄膜的功率密度。

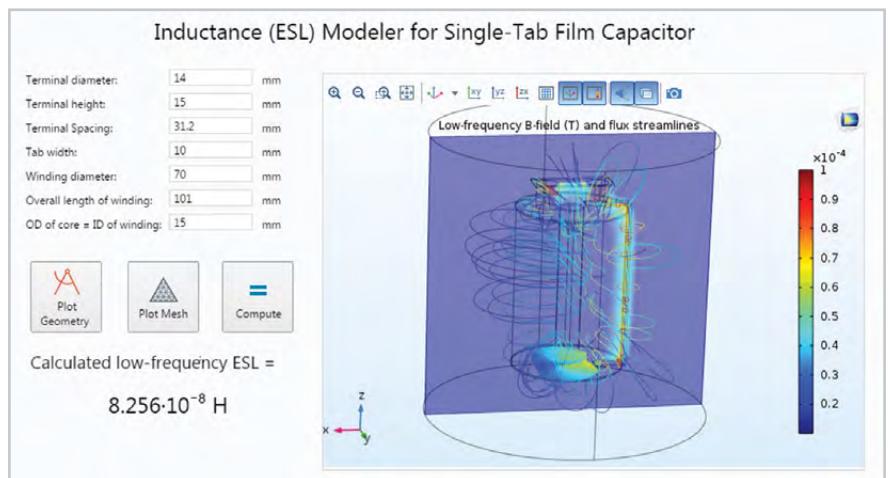
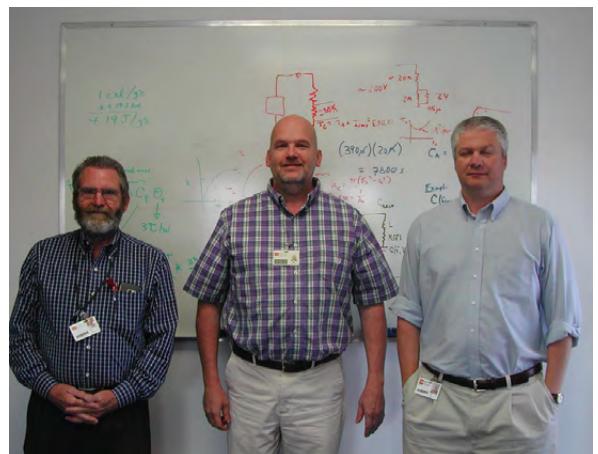


图 7. 此仿真 App 可用于计算单接头薄膜电容器的等效串联电感。

试电容器的性能和不同参数对电容器的影响。这种方式将仿真的强大力量延伸到了整个设计和生产过程。

Parler 总结道：“多物理场模型和仿真 App 的存在大幅简化了电容器的设计流程，帮助我们为全世界的客户更快地开发出性能更优的定制化电容器。” ❖



CDE 公司的员工，从左至右依次为：研究员 David Leigh、研发主管 Sam Parler、电容器工程师 Trent Bates。



## 马恒达摩托车 轰鸣声背后的仿真分析

借助多物理场仿真, 印度马恒达摩托车公司对高端豪华摩托车的发动机进行了改进, 在符合噪声限值的同时, 最大限度地维持了客户满意度。

作者 **VALERIO MARRA**

近年来, 马恒达摩托车公司 (Mahindra Two Wheelers) 在印度市场推出了多种款式的摩托车和轻便摩托车。他们在产品开发初期便引入了数值仿真工具, 对摩托车发动机、进气和排气系统的噪声、振动与声振粗糙度 (noise, vibration, harshness, 简称 NVH) 性能进行了研究和优化, 这使得驾驶员和乘客即使行驶在印度颠簸的道路上, 也可以享受卓越的车辆性能带来的舒适驾驶体验。

马恒达的工程师使用数值仿真获取了所需的数据和知识, 并基于分析结果对摩托车发动机的结构设计进行改良, 使噪声降至期望水平。公司的研发副经理 Niket Bhatia 表示: “COMSOL 软件帮助我们大幅减少了设计迭代次数, 为我们节省了宝贵的时间。”

### ⇒ 使噪声达到最优水平

发动机中存在许多噪声源, 进气和燃烧过程、活塞、齿轮、配气机构和排气系统均可能发出噪声。燃烧噪声是由气缸内急剧上升的压力引起的结构振动造成的。这些振动通过

轴承从传动系统传送到发动机外壳, 进而向周围环境中辐射噪声。

若只依靠物理测试进行声学分析, 不仅实验费用过高, 耗时也会过长。考虑到这一点, 马恒达的研发团队决定采用声学仿真作为物理测试的必要补充, 希望能够更为全面地对发动机结构的噪声辐射来源进行分析。研究的目的是找到发动机中最大的噪声源, 并提出结构改进方案, 从而有效降低了噪声。

马恒达的研究人员利用 COMSOL Multiphysics® 软件, 对燃烧负荷作用下的单缸内燃发动机执行了声辐射分析。工程师将整个发动机包裹在计算域中, 并在计算域外部添加了完美匹配层 (perfectly matched layer, 简称 PML)。

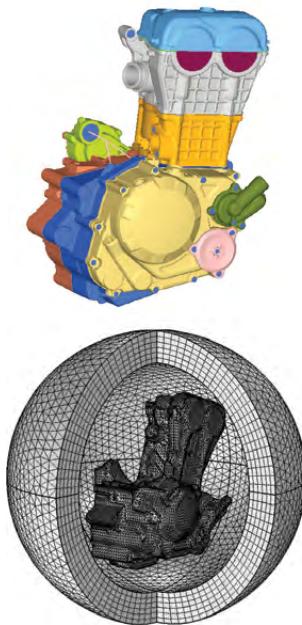


图 1. 上图: 发动机的 CAD 几何模型。下图: 网格剖分后的三维模型被完美匹配层 (PML) 包围了起来。

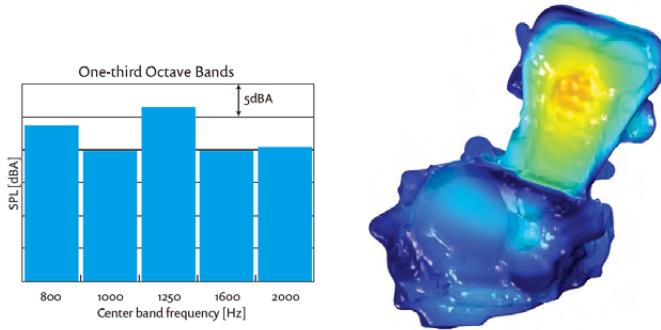


图 2. 左图:三分之一的倍频图;右图:声压级 (SPL) 仿真结果的三维表面图。

PML 的作用是通过衰减向外辐射的声波,使得在计算域边界处的反射极小或完全没有反射(图 1)。这种做法能够在保证结果准确的前提下,有效地减少计算域的大小。

研究团队决定将分析的频率范围限定在 800~2000 Hz 之间。这一限定是因为实验表明,在上述声音频率范围,燃烧负荷下的发动机噪声辐射是摩托车噪声的主要来源。选定一段频率范围有利于研究团队节省计算资源,更加明确地找出哪些区域会向外辐射最多的噪声。

基于上述分析,团队人员对声压级 (sound pressure level, 简称 SPL) 展开了深入研究,并调整了缸体和缸盖的相关参数(图 2),例如增加肋高和壁厚以及加固安装位置。通过调整这些参数,研究人员成功降低了目标频率范围内的声压级。

### ⇒ 进气结构降噪处理

进气噪声和排气噪声是产生通过噪声 (pass-by noise, 即车辆整体通过时引起的噪声) 的主要因素。而进气噪声主要源于空气过滤器(通常由塑料制成)结构辐射的噪声。对此,研究人员分析了由塑料制成的空气过滤器壁上的声学传递函数(acoustic transfer function, 简称 ATF)。为了改进 ATF,他们添加了肋片以加强空气过滤器的结构强度(图 3),这有助于降低其结构噪声(图 4)。

### ⇒ 分析传输损耗以提升消声器的效果

有趣的一点是,相关法规对摩托车的噪声水平提出了限制,然而消费者却希望摩托车能发出更响亮的轰鸣声,因为他们认为这种轰鸣声是发动机拥有强劲动力的标志。法规与消费者需求的冲突给马恒达的工程师带来了挑战。工程师们需要在保持通过噪声符合规定的前提下,加大从消声器中发出的低频轰鸣声,同时降低较高频率下的声压级。

除了需要分析消声器对发动机排气噪声的消减外,与消声

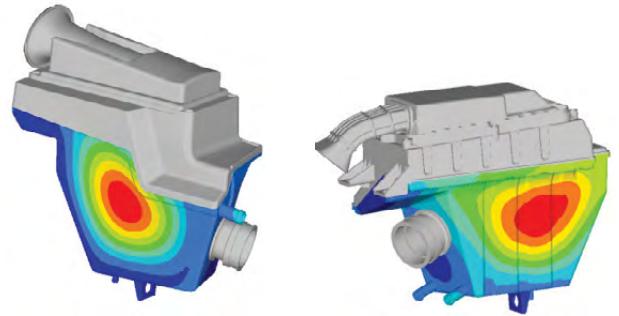


图 3. 空气过滤器结构图。左图:初始设计;右图:改进后的设计。模型中添加了肋片用于改进 ATF。

器相关的许多其他因素也需要考虑,例如提供低回压的能力,以及如何满足通过噪声的相关规定。汽车排气系统中消声器的性能可量化为以下三个参数:传输损耗、插入损耗和辐射噪声水平。其中,传输损耗被认为是最重要的参数,它只与消声器的设计有关,而与压力源无关。马恒达研发团队的任务正是通过预测摩托车消声器的传输损耗,从而将一定频率范围内的损耗优化至期望水平。

为此,研究人员选择单缸摩托车发动机的消声器作为分析对象,并使用了

COMSOL Multiphysics 对消声器的传输损耗进行了分析。通过软件中的“声学模块”,他们在适当的位置施加了连续性和硬声场壁等边界条件。

借助软件内置的转移阻抗模型,研究团队利用孔隙率等参数对管道中的穿孔区域进行了定义。需要输入的参数包括面积孔隙率、挡板和管道厚度以及孔径。至于玻璃棉等多孔材料,可使用软件中的多孔声学模型对流阻率进行定义。研究人员在模型的入口处施加单位压力作为输入,同时将平面波辐射条件应用于入口和出口。

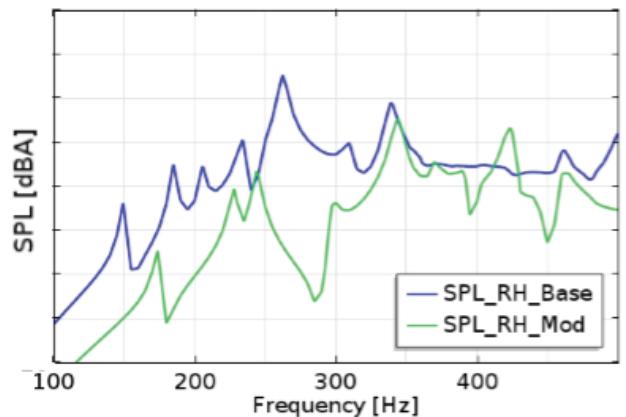


图 4. 仿真结果显示,改进后的空气过滤器设计有效地降低了结构噪声。

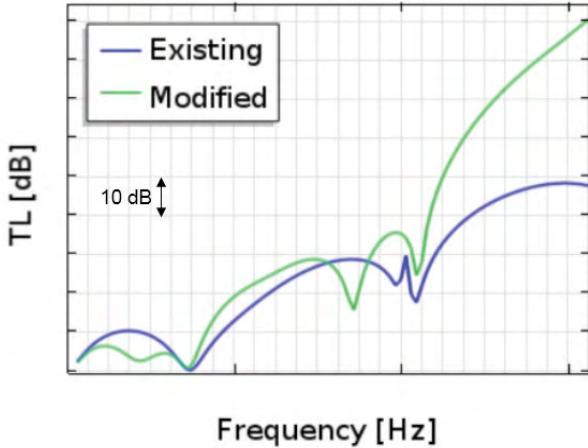


图 5. 不同设计的传输损耗 (transmission loss, 简称 TL) 对比图。设计的改进主要体现在:降低在低频的传输损耗,并提高在高频的传输损耗。修改后的设计不仅符合了规定,还保留了客户喜爱的“轰鸣声”。

**“我们使用 ‘App 开发器’ 创建了一个仿真 App, 从而可以非常方便地对比仿真分析的输出文件, 并绘制声压级数据, 而为我们节省了大量宝贵的时间。”**

— ULHAS MOHITE, 马恒达公司研发经理

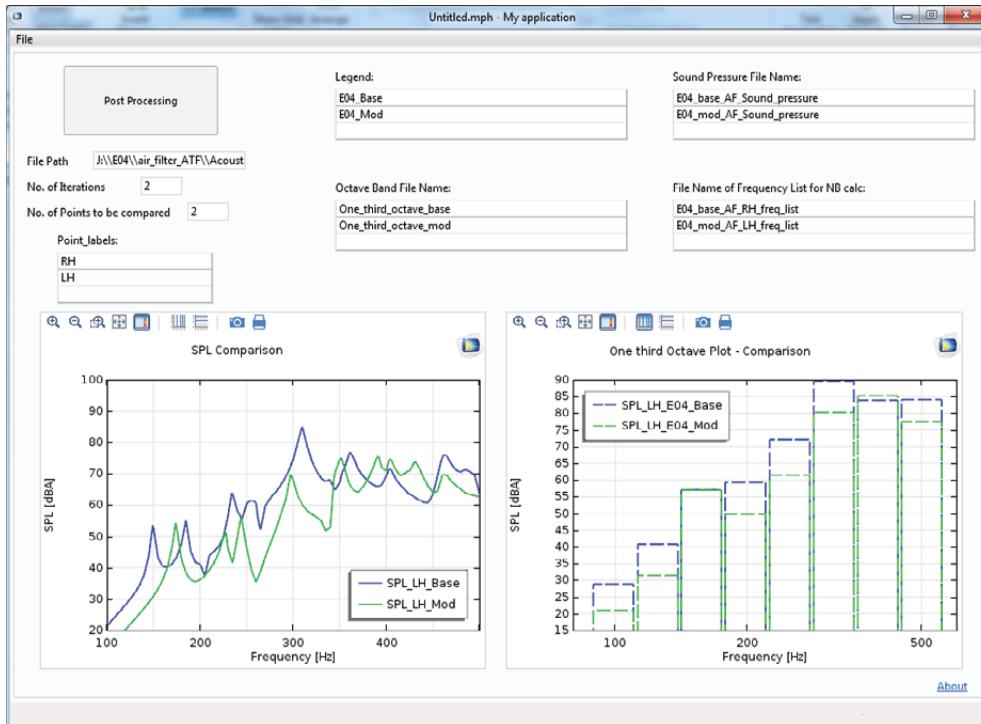


图 6. 借助“App 开发器”, 马恒达的工程师开发了一个操作简便的仿真 App, 可用于对比分析文件以及绘制声压级 (SPL) 数据。

基于分析结果, 设计人员加长了消声器内部的管道长度。改进后的消声器大幅降低了低频下的传输损耗 (图 5), 因此能够增加低频下的噪声水平, 也就是保留了用户喜爱的轰鸣声。

⇒ **在设计初期引入优化流程, 节省成本和时间**

“我个人非常欣赏 COMSOL 软件的灵活性以及像 COMSOL API 这样的内置工具。”马恒达公司研发经理 Ulhas Mohite 评论道, “在软件中, 我们可以通过使用 Java 代码自动执行仿真任务, 例如在处理声学分析时, 我们能够针对不同的频率步长采用不同的网格, 从而在仿真精度和计算时间之间找到最佳的平衡点。除此之外, 软件还能在仿真运行时自动输出例如表面声压级绘图和远场声压级数据等信息。由于无需再对数据进行手动的手后处理和数据导出, 这帮助我们节省了大量的时间。”

此外, Mohite 还认为 COMSOL 软件内置的“App 开发器”具有非常实用的价值。他补充道: “我们使用 ‘App 开发器’ 创建了一个仿真 App (图 6), 可以让我们可以非常方便地对比仿真分析

的输出文件, 并绘制声压级数据, 这为我们节省了大量宝贵的时间。”

对比结果表明, 仿真分析的结果与物理实验数据高度匹配。通过仿真分析, 马恒达的工程师能够在设计阶段的初期基于分析结果调整结构设计, 并采取正确的纠正措施, 从而减少了产品开发所需的时间和成本。Bhatia 总结道: “通过实验的验证, 仿真分析为我们提供了清晰的产品优化思路, 帮助我们有效地解决了摩托车的噪声问题。” ❖

**参考文献**

1. Mohite, U., Bhatia, N., and Bhavsar, P., "An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load," SAE Technical Paper 2015-01-2244, 2015, doi:10.4271/2015-01-2244. (<http://papers.sae.org/2015-01-2244/>)
2. Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling, COMSOL Blog, <https://www.comsol.com/blogs/reducing-motorcycle-engine-noise-with-acoustics-modeling/>

# 仿真 App 优化电子设备保护屏的生产工艺

科立视公司使用多物理场仿真技术对玻璃制程进行了优化, 并通过仿真 App 提升了部门间的协作能力。

作者 **VALERIO MARRA & LEXI CARVER**

**智**能手机和平板电脑已经成为我们日常工作学习和休闲娱乐的亲密伙伴。在这些移动设备的屏幕上有一层玻璃, 被称为盖板玻璃, 也叫保护玻璃。盖板玻璃的主要作用是保护屏幕、保证透光率和装饰外观。

盖板玻璃属于大规模产业化玻璃中的高端产品, 价格远高于普通玻璃。生产工艺难度极高是造成价格昂贵的主要原因。此外, 由于盖板玻璃在不同的环境下呈现不同的性能, 因此对玻璃的制程提出了更为严苛的要求。这些技术要求给企业的产品开发部门带来了巨大的挑战。

科立视材料科技有限公司 (KMTC, 以下简称“科立视”) 是一家致力于显示技术、触控器件产品和高科技材料研发与生产的公司 (图 1)。“我们主要为智能手机和平板电脑等电子设备提供盖板玻璃成品。”科立视的研发经理洪立昕博士表示:“为了满足日益增长的多样化需求, 应对触控显示产业的机遇与挑战, 科立视正在借助多物理场仿真来评估和优化玻璃制程。”

## ⇒ 玻璃制造过程中的多物理场问题

显示器玻璃主要有三种制备技术: 浮式法、流孔下引法和溢流法。其中溢流法是目前使用最为广泛的平板玻璃生产技术之一, 其原理是将两股从溢流槽顶端溢出的玻璃熔体汇合, 然后在空气

中自然冷却形成超薄玻璃 (图 2 中的左图)。相比于其他方法, 使用溢流法制成的玻璃表面光洁平整, 切割区域干净无尘, 成品无需研磨, 从而避免了因研磨抛光等后续加工过程引起的表面的特性差异。

作为国内率先使用溢流法技术生产高铝盖板玻璃的企业, 科立视对这一技术的应用已达到行业领先水平。“特殊的制造工艺使玻璃表面不会在成型过程中留下痕迹或损伤, 制成的玻璃基板表面光滑、纯净、无瑕疵, 符合电子消费市场的产品需求。”洪博士评价道。

在溢流法中, 高黏度的均质玻璃熔体从窑炉出发, 经铂金通道流入由耐火材料烧制成的溢流槽中 (图 2 中的左图)。熔融的玻璃从溢流槽中溢出后, 从槽的两侧分两股流出, 并在重力作用下沿溢流槽的壁面向下流动 (图 2 中的右图)。溢出的玻璃熔体在溢流槽底部汇合, 持续溢流的玻璃熔体在下拉引板的控制下在空气中冷却,

形成超薄玻璃。

在制备过程中, 玻璃的厚度由入口流量和引板机构进行控制, 其中入口流量还决定了玻璃的产量。在此过程中, 由于温度会对玻璃的粘度与流速产生影响, 因此必须对温度进行严密的监控, 以避免玻璃出现翘曲。综上所述, 整个玻璃制造过程是一个“流体-固体-热-电”相互耦合的多物理场问题。

科立视的工程师使用多物理场模型对玻璃熔化系统的电加热效果进行了评估。同时, 他们将仿真模型封装成了可模拟实时制造过程的仿真 App。获得的仿真结果被产品部门用于指导实际的生产过程。

科立视在 COMSOL Multiphysics® 软件中创建的模型耦合了流体、结构、传热和电场等多种物理现象。通过运行玻璃熔体的流体和传热仿真, 研发团队计算出了流出玻璃在冷却前其表面的厚度分布, 以及玻璃在成型过程中产生的应



图 1. 三维盖板玻璃 (右图) 能够帮助设计人员为智能手机与平板电脑用户带来更为出色的显示效果。

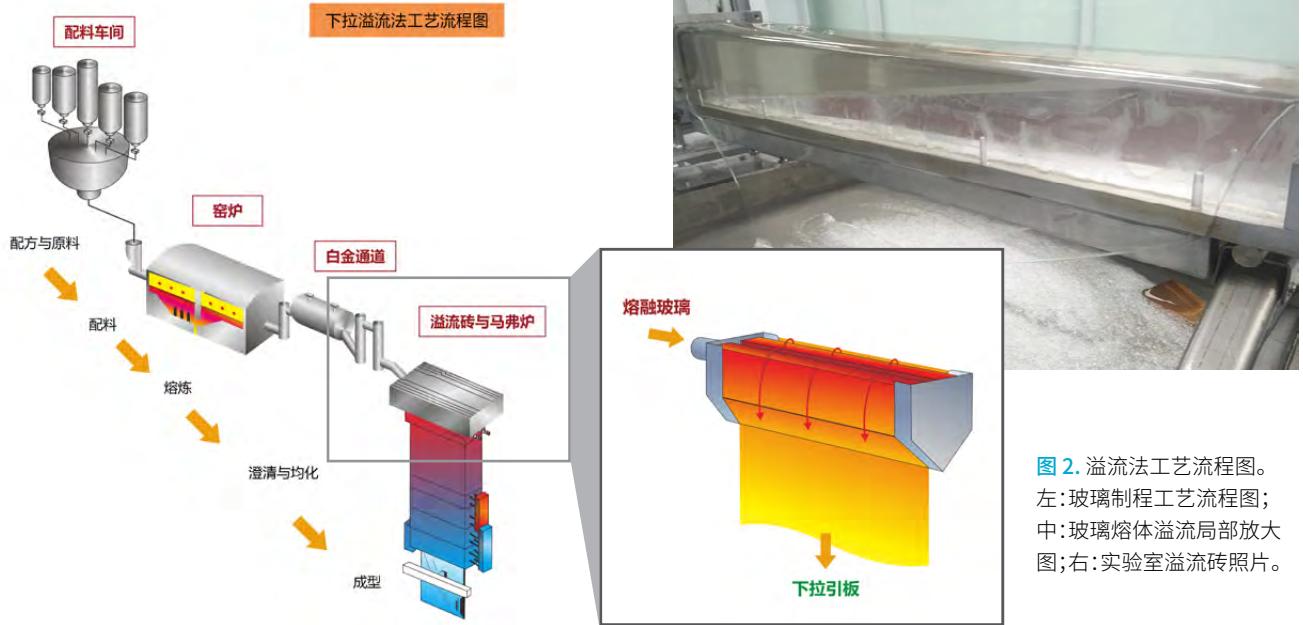


图 2. 溢流法工艺流程图。左: 玻璃制程工艺流程图; 中: 玻璃熔体溢流局部放大图; 右: 实验室溢流砖照片。

变(图 3)。“借助 COMSOL 软件, 不仅可以输入自定义的本构方程, 同时还能调整入口速度、溢流砖的倾斜角等参数, 这让我们得以在大规模生产前就完成了对工艺条件的优化。”洪博士补充道。

研发团队不但使用多物理场仿真的结果预测了成品板的厚度、均匀度、光滑度和瑕疵等多个会影响玻璃板品质的因素, 同时还基于仿真结果优化了制造设备和工艺条件。洪博士说道: “COMSOL 软件让我们能够针对不同的定制需求来求解多物理场问题。”

### ⇒ 模拟玻璃熔体的电加热系统

在制造过程中, 当玻璃熔体与耐火材料接触时, 可能会在玻璃组分中带入气体夹杂物, 导致玻璃板成品中掺杂气泡, 同时影响玻璃成品的重量。铂金通道可在玻璃熔体与耐火材料接触前, 对玻璃熔体进行澄清、均质化、搅拌以及温度调节等预处理工序, 用于去除杂质的影响。由于采用可控交流电加热管对温度进行实时控制, 因此可使玻璃熔体在通道的各个区段具有不同的粘度。

铂金通道中的交流加热管有两种结构, 即非均匀壁厚直管和均匀壁厚 Z 型管(图 4)。洪博士解释道: “如果没有 COMSOL Multiphysics 的帮助, 我们便无法对管壁上的电流密度分布, 以及对不同结构管型在电加热过程中的加热效果进行评估。”

多物理场模型涉及的物理现象为焦耳热, 可以通过耦合电流和传热进行模拟。控制方程使用有限元法进行离散, 并采用频域-稳态研究进行求解。通过计

算, 研发团队得到了两种管型结构的交流电加热效果, 以及表面电流密度分布(图 4)。仿真结果为研发团队展示了两种加热管不同的加热效果。经过实验验证表明, 仿真结果与实际测量数据高度吻合。

### ⇒ 仿真 App 促进企业内部协作

洪博士表示: “要建立如此专业的模型, 不仅需要深入了解所模拟的系统, 同时还需要丰富的仿真经验。”借助

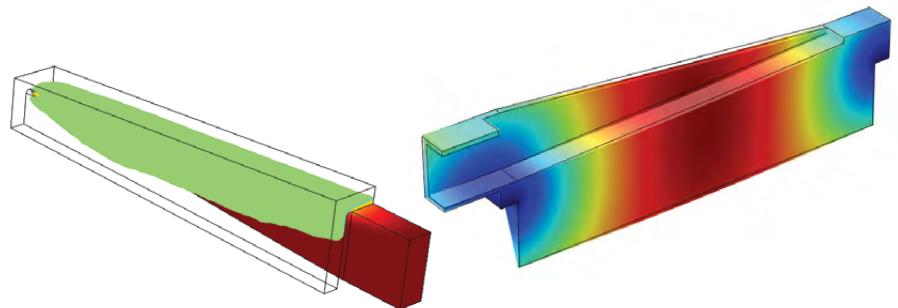


图 3. 使用 COMSOL 软件对熔融玻璃溢流过程的仿真结果。结果显示了玻璃液的流动区域(左图绿色区域)和溢流砖的应变情况(右图)。

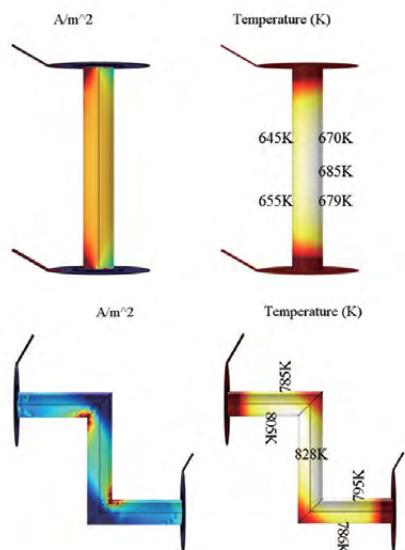


图 4. 仿真结果预测了加热管内玻璃的状态。顶部模型为非均匀壁厚直管，底部模型为均匀壁厚 Z 型管；左侧模型绘制了电流密度分布，右侧模型绘制了温度分布。

COMSOL 软件内置的“App 开发器”工具，公司内各部门的同事能以最高效的方式分享不同领域的专业知识。仿真专业人员可以对模型进行定制，只开放部分选定的参数供其他使用者访问，并基于模型提供个性化的用户界面，支持在整个企业内部进行部署，让那些不具备建模知识的同事也能独立运行复杂的分析。

科立视的仿真团队目前隶属于研发部门，但他们通过仿真 App 与工程部门加强了沟通与协作。他们的下一个目标是让客户也能直接运行仿真分析，并根据自身的设计需求对参数进行调整。

科立视的仿真团队开发了用于研究铂金通道的仿真 App，可以计算玻璃制程中加热管内的流体温度、速度及应力分布，以帮助预测玻璃的应力水平和成品状态（图 5）。App 中的输入参数包括玻璃温度、入口速度和加热功率。他们利用稳态分析对操作条件的合理性进行了评估及优化，并使用瞬态分析对制程的实时情况进行模拟，以此为实际的生产提供

必要的数据及现场指导。

“工程师可以很方便地通过 App 的界面修改输入参数，从而对加热管内的玻璃状态等一系列情况进行预测。”洪博士补充道，“这既简化了设计人员的工作，又提高了整个团队的工作效率。”

整个仿真工作流程也得到了简化：仿真专业人员首先设计一个参数化数学模型，添加各种供后续使用的设计参数，并将其封装成一个仿真 App，然后就可以分享给相关的工程师。设计人员无需了解多物理

场仿真的原理，只需要修改参数就能运行仿真分析，灵活、高效地解决实际问题。

仿真团队通过安装在计算集群上的 COMSOL Server™ 产品，将仿真 App 分发给研发部门和工程部门的同事，为其提供技术支持。使用者可以直接运行仿真 App，并能够针对客户的具体需求及时为生产工艺提供优化方案。洪博士对此总结道：“仿真 App 兼顾了生产成本和信息安全问题，是 CAE 仿真团队在长远的发展中不可或缺的强大工具。”

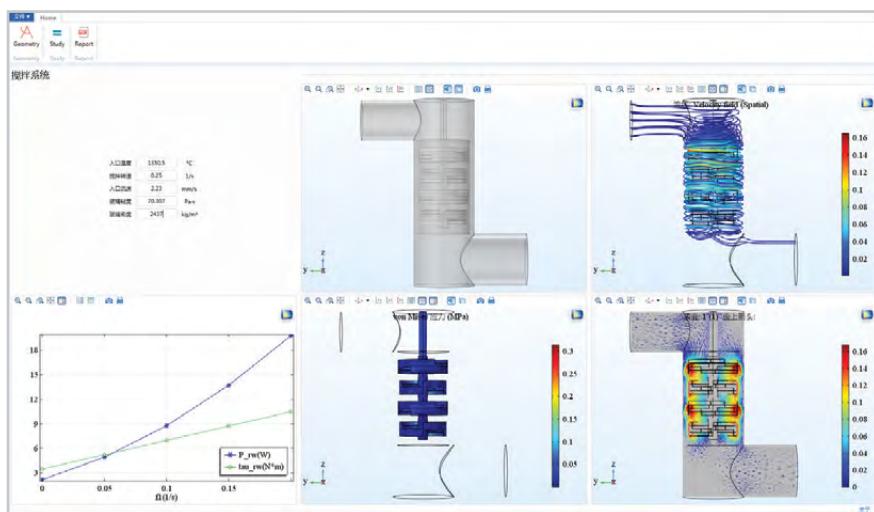


图 5. 用于预测加热管内玻璃状态的仿真 App。用户可以修改玻璃温度、入口速度、不同区段的加热功率等参数，从而研究加热管内流体的温度、速度和应力。



从左到右依次为：杨振龙、杨济民、陶礼耀、洪立昕（科立视研发部经理）。

# 通过部署仿真 App 提升销售业绩, 巩固客户关系

GrafTech 公司的仿真工程师通过在企业内外部署多物理场 App, 大幅优化了销售流程。

作者 **NATALIA SWITALA**

虽然销售人员通常并不会将仿真工程师视为销售过程中的可用资源, 但是如果能够实现跨部门合作, 企业的销售工作将会事半功倍。Rick Beyerle 是 GrafTech 的子公司——新能源技术 (AET) 公司创新技术部的资深研究员, 他与销售团队积极合作, 致力于将仿真 App 引入到碳和石墨产品的销售过程中。

## ⇒ 赢得客户的信任和支持

Rick 和同事们采用了多物理场仿真对碳和石墨在电、结构和热力学方面的性能进行了研究, 并对多个工业应用的设计和工艺进行了优化。在与销售团队协作的过程中, Rick 很快发现, 与潜在客户建立信任是缩短销售周期的关键因素之一。“很多时候, 为客户提供‘概念验证’有利于帮助双方建立信任。” Rick 解释说。

在定制化仿真 App 出现之前, 针对每一位客户的具体需求, 这种“概念验证”都需要 Rick 和他的团队调配研发资源来修改和反复运行验证模型。由于销售团队没有接受过专门的数值建模培训, 因此应用工程师会被要求优先为销售人员提供实时测试, 而那些仿真测试往往非常耗时。“一些模型具有数百个参数和边界条件, 虽然这些参数和条件在外行看来并不那么重要, 但每一个因素都可能对仿真结果产生重大影响。” Rick 说。

## ⇒ 仿真 App 为跨部门协作铺平道路

Rick 是一位非常有远见的工程师, 他致力于以一种创新的方式让整个企业从仿真中受益。为此, Rick 与应用工程师团队使用 COMSOL Multiphysics® 软件中的“App 开发器”, 基于他们的标准多物理场模型设计了一个简单易用的仿真 App, 并将其命名为“SpreaderCalc”。有了这个 App, 销售工程师和现场专员便可以在对造价昂贵的物理样机进行测试前, 先利用一系列虚拟样机进行性能预测 (见图 1)。

卓越的技术成果和优异的销售业绩离不开全公司各部门的共同努力。因此, Rick 希望销售部的同事能够使用仿真软件来进行协作, 实时解答潜在客户的问题。“客户经常会要求我们提供热管理方案, 这些方案不仅要满足安全性和可靠性的要求, 还需要能够消除温度因素对设计方案带来的限制, 尤其是针对那些受特定空间和几何结构约束的情况。这样才能最大限度地提升用户体验。”销售总监 Pierre Hatte 表示, “创新技术部同事开发的新工具帮助我们获得了与用户进行第二次会面的机会, 如果你从事过销售工作, 就一定会明白, 第二次会面是促成订单的最佳时机。”

## ⇒ 将仿真 App 交到客户手中

开发完成专为销售人员定制的仿真 App 后, 便可以通过 COMSOL Server™ 产品对其进行部署和集中管理, 方便用户在安全的网络环境中访问和运行这些 App。“有了仿真 App, 不具备专业的建模知识也能获取高精度的多物理场仿真结果,” Rick 对此评论道, “随着仿真 App 的进一步普及, 繁杂的工作流程会变得更加简洁流畅、开放包容。”当销售

**“利用仿真 App 向潜在客户直观地展示和对比不同配置带来的传热性能差异, 这就让客户在购买衣服前先试穿一样, 他们会深信结果能充分地贴合自己的需求。”**

— PIERRE HATTE, GrafTech 公司销售总监

团队在整个销售过程中对仿真 App 的适用性进行完整的测试后, 公司便可以通过 COMSOL Server 将 App 交到客户手中。Rick 继续说道: “在此之前, 我们每年只能提供一个以客户为导向的模型, 这是因为仿真的成本过于昂贵, 无法为大多数客户提供。而现在, 应用工程师只需花一个小时便能运行仿真模型的实验设计, 再也不会像以前那样需要一周时间来进行一系列的测试。Pierre 对比评论道: “仿真 App 加强了用户对我们产品的信任, 这些 App 均由资深的仿真专业人员基于多物理场模型开发而成, 在继承了模型强大功能的同时, 大幅提升了易用性。利用仿真 App 向潜在客户直观地展示和对比不同配置带来的传热性能差异, 这就让客户在购买衣服前先试穿一样, 他们会深信结果能充分地贴合自己的需求。”

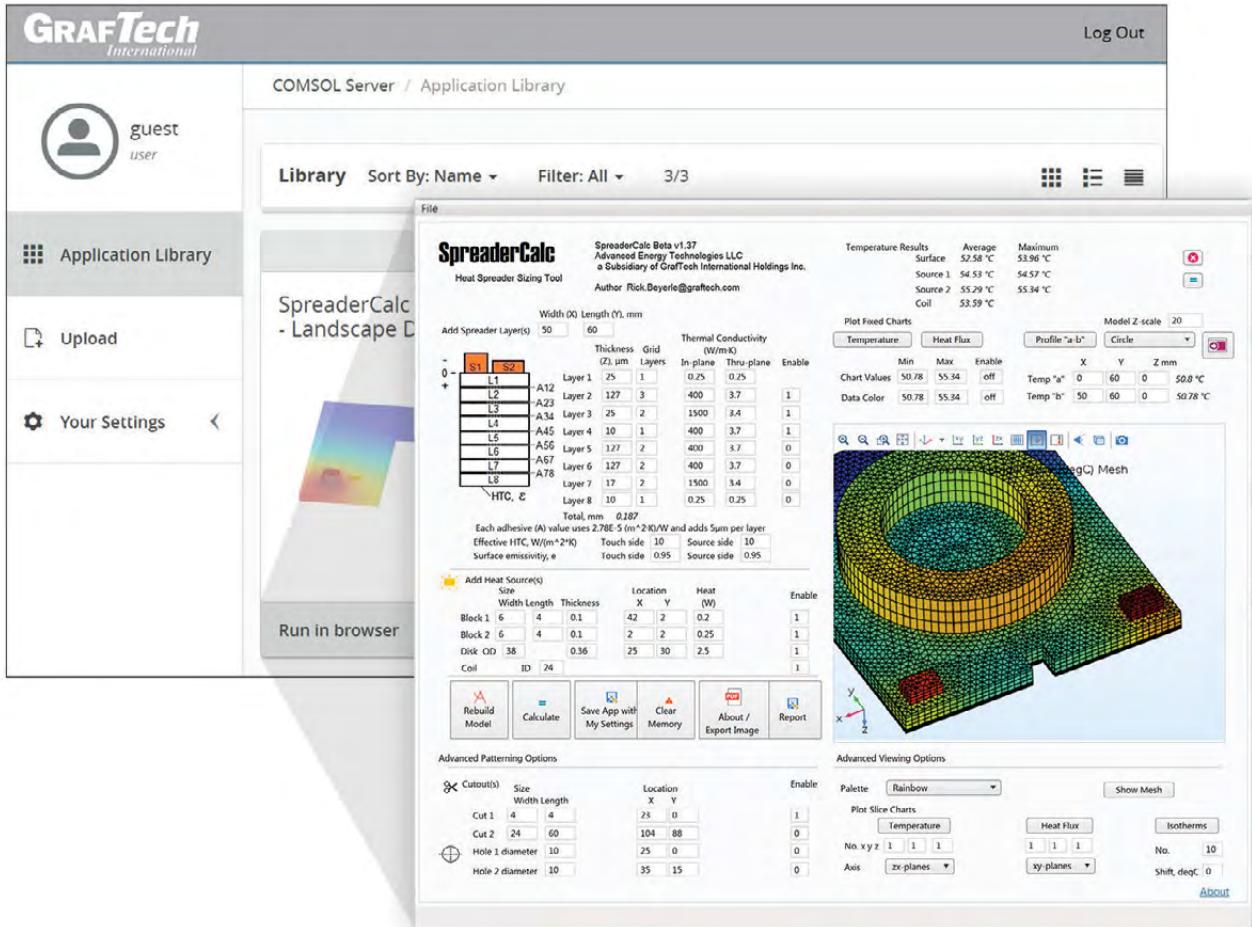


图 1. 通过使用本地安装的 COMSOL Server™ 产品, 遍布全球的 GrafTech AET 职员可以通过公司内部网访问 App.SpreederCalc App 可以比较消费电子产品中用于散热的石墨箔的传热性能。

“我们相信, 仿真 App 能帮助客户在下单前做出更加明智的决定。有些采购部门迫于成本控制压力, 偶尔会选择忽视工程规范。当缺少技术支持时, 他们很难对一款高性能材料做出评判, 因此价格的高低便成了唯一标准。” Rick 解释道。

“由于石墨材料具有高度的正交各向异性, 因此对其进行模拟十分困难。以前, 即使是粗略的分析也难以实现。现在, 工程师无需离开办公桌, 便能得到高质量的估算结果。对我而言, 这一切的关键在于, 某些特定的功能只有 COMSOL 软件才能实现。”

仿真 App 不仅促进了各部门之间的协作, 还提高了合作的透明度。例如, 用户可以使用 App 直观地向公司展示他们做出采购选择的原因。通过 COMSOL Server, 用户只要牢记登录信息就能运行 App 并下载仿真结果。这种方式为采购部门的工作人员提供了极大的便利。基于 SpreaderCalc 的成功经验, GrafTech AET 公司进一步拓展了软件基础设施建设, 并针对例如热界面材料、电磁/射频干扰屏蔽和快速加热工艺等不同的细分领域开发出了一系列衍生技术和产品, 帮助他们开拓更为广阔的市场。❖

## 扩展阅读

如果您有兴趣了解有关碳和石墨在热管理中的工业应用, 请参阅 2016 年出版的《多物理场仿真》杂志第 3 页的文章 [cn.comsol.com/offers/multiphysics-simulation-2016-cn]。



左图: Pierre Hatte, GrafTech 公司销售总监。  
右图: Rick Beyerle, GrafTech 公司资深研究员。

# 多物理场分析 助力地下给水管道的泄漏检测

地下给水管道的声速的估算对于准确定位泄漏点来说十分重要。Echologics 工程公司创建了一个有限元仿真框架, 用于模拟管道中的声学行为, 以及计算声速的变化。

作者 **VALERIO MARRA**

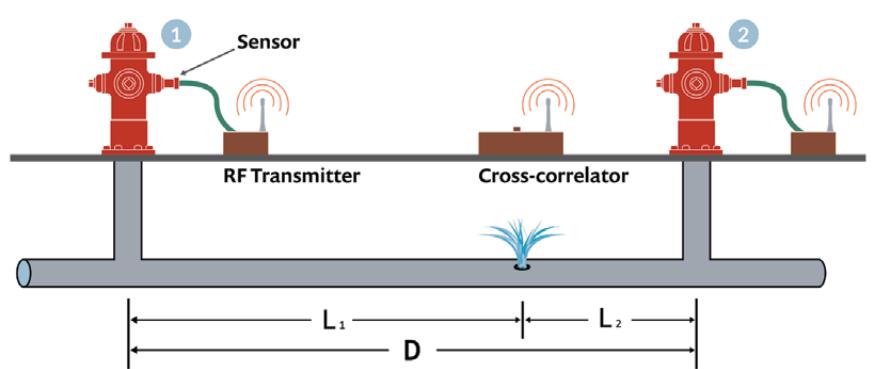


图 1. 左图: 检测中的泄漏管道; 右图: 泄漏检测设置示意图。泄漏点位于两个传感器之间, 传感器距离为  $D$ 。泄漏噪声沿两个方向传播, 相关仪测量了声音到达每个传感器所需的时间。根据管道中的声速, 即可推算出确切的泄漏位置。图注: Sensor - 传感器; RF Transmitter - 射频发射器; Cross-correlator - 互相关仪

新鲜、洁净的水源是十分宝贵的资源, 地下输水管道一旦发生泄漏, 就会造成巨大的损失, 因此对管道进行泄漏检测十分重要。然而, 随着管道基础设施的逐渐老化, 对管道泄漏点的定位将变得极其困难。

为了解决这一问题, 位于加拿大多伦多的 Echologics 工程公司 (隶属于 Mueller 加拿大有限公司) 利用其独一无二的声学检测技术, 研发出了一种无需开挖, 便可对深埋地下的管道进行泄漏检测的方法。“泄漏会产生噪声,” Echologics 公司声学领域的研发科学家 Sebastien Perrier 解释道, “管道是会说话的, 如果你仔细听, 他就会告诉你哪里发生了泄漏。” Perrier 是一名机械工程师, 专长于

声学 and 振动、结构耦合, 以及信号处理等领域。

借助相关函数和安装在管道或消防栓上的声学传感器, Echologics 公司对声波的传播时间进行了测量。如果管道的泄漏点位于某两个传感器之间, 传感器就会检测到由泄漏所发出的噪声, 然后便可根据相关函数的计算结果来确定同一泄漏噪声传播到两个传感器所产生的时间差。当确定了管道中的声速后, 就能轻而易举地测算出泄漏点的具体位置 (图 1)。

作为水利基础设施声学检测系统的创新领导者, Echologics 利用上述相关函数研发出了可准确定位管道泄漏点并对管道泄漏进行长期监测的技术。Echologics 公司的主要产品包括 LeakFind-

erST™ 泄漏噪声相关仪 (图 2) 和 Echo-Shore®-DX 管道监测系统 (图 3)。在 Echologics 相关仪的帮助下, 现场检测人员可利用发射器、传感器和笔记本电脑上的操作界面对各类管道的泄漏情况进行检查。更为重要的是, 利用这种声学技术, 工作人员在管道泄漏初期便能检测出极其微小的泄漏点, 从而及时地防止管道的进一步损坏, 这将大幅减少维修费用的支出。

Echologics 产品的正常工作依赖于对不同类型管道内声速的精确测算。声速主要取决于材料类型, 与管道刚度成正比, 并受管道几何结构的影响。

“此项技术的核心在于研发出灵敏度高的 PVC 管泄漏点检测方法。” Perrier 解

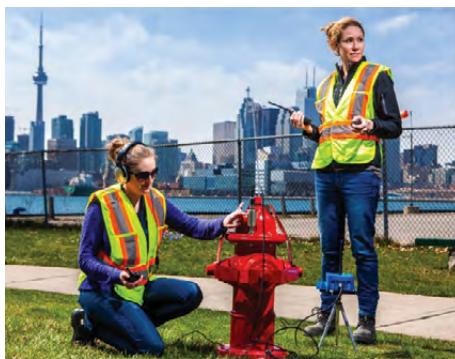


图 2. LeakFinderST™ 相关仪是一款简单易用、体积小巧的泄漏噪声相关仪。



仿真显示,当传感器的距离发生变化时会出现信号噪声,仿真结果还表明,实际上已经用塑料修补过的管道并未被包含在测试中。此外,Perrier 的仿真还能预测在声波传播到传感器的过程中管网内的压力,以及采用不同材料的区段中的机械阻尼,这就为上述问题提供了一种可视化的方法(图 4)。

### ⇒ 将仿真 App 纳入日常工作

Perrier 在计算模型的日常使用中看到了定制化仿真 App 的优势。他以 COMSOL Multiphysics® 分析为基础,利用软件内置的工具开发出了仿真 App。这个 App 包含了声-结构相互作用、管道声学,以及瞬态和频域研究(图 5),并支持用户在运行中修改几何参数和材料属性,深入分析单段管道或整个管网。

用户可在 App 中通过输入管道区段的长度、段数和管道特性,对输水管网进行定义。从预定义列表中选择铸铁或塑料等材料,App 即可自动计算出相应材料中的声速。随后,使用者只需将基于实地测量得到的相关性分析结果输入仿真 App,便能预测泄漏发生的位置。

把多物理场模型转化为仿真 App,这种方式极大地方便了研究团队与企业

“通过开发仿真 App,我可以将复杂的模型分享给同事们,而且还能随时随地访问它们。”

— Sebastien Perrier, Echologics  
公司声学领域的研发科学家

内其他工作人员的合作交流。Perrier 表示:“通过开发仿真 App,我可以将复杂的模型分享给同事们,而且还能随时随地访问它们。”仿真 App 支持密码保护,可通过本地安装的 COMSOL Server™ 产品进行部署,这一方式不仅可以即时地



图 3. EchoShore®-DX 系统将路边常见的消防栓变成了智能泄漏检测装置。

释道。这是因为与金属相比,塑料具有高衰减、高阻尼的特性。更棘手的是,原先的供水系统由铸铁管制成,然而现在却要在部分区段用塑料来进行修补。

Perrier 的职责之一是保证复杂的声学相关性算法的准确并持续对其更新。他必须深入理解基础层面的物理原理,才能针对地下管道设施进行优化以及开发新一代的泄漏解决方案。为了加快设计进程,并与其他部门的同事分享研究成果,Perrier 创建了计算声学模型,并基于模型开发了仿真 App。

### ⇒ 在发生故障前找到泄漏点

数值仿真是如何帮助我们预测管道中的声波传播的呢?管网分析通常既复杂又耗时。研究人员有时需要了解单一

管道内的声音传播和振动响应情况,有时则希望纵观整个管道系统的情况。因此在确保精度的前提下,模型的复杂程度和运行分析所需的时间,会因模型涉及的物理场细节的不同而存在巨大差异。

在设计初期,Perrier 面临的核心问题是如何确保管道中每个区段的声音传播速度均准确无误。为了达到这一目的,他在后续的研究工作中采用了多物理场仿真在管网分析中,需要对声学、流体和结构力学等多个物理场进行耦合分析,仿真分析帮助他快速获取了所需的数据。

仿真在 Perrier 的工作中用途广泛。比如他能够通过仿真了解微小的误差幅度,并据此对现有技术进行改进。他通过声学仿真深入探索了管网的材料和几何参数,获得了不同情景的预测结果。声学

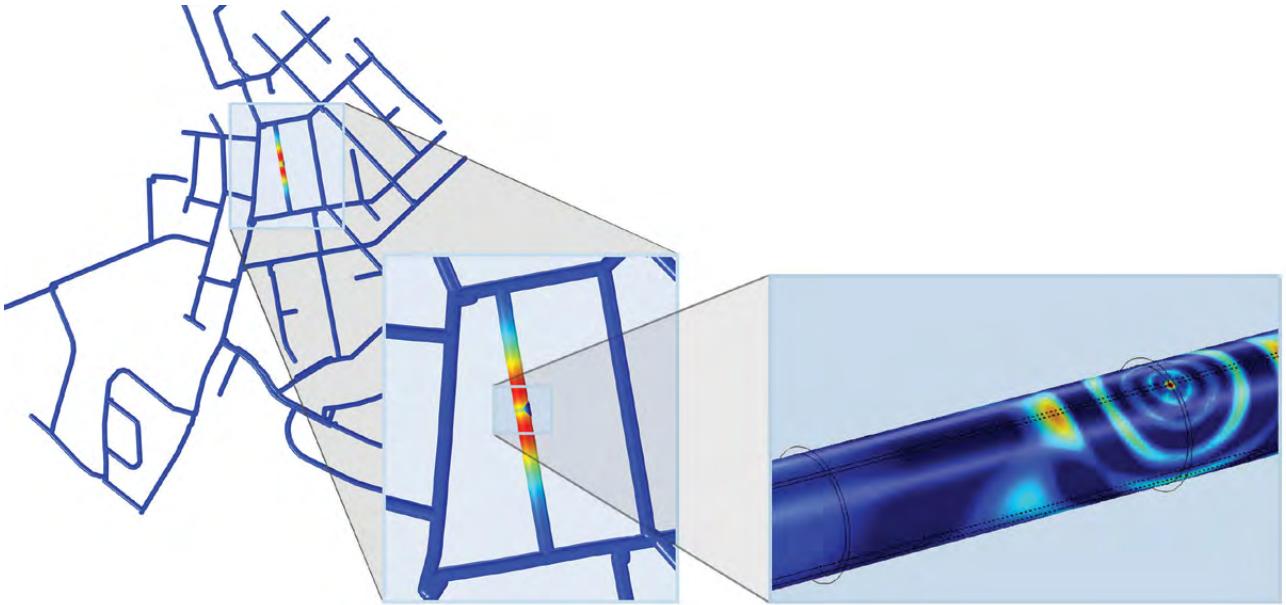


图 4. 管网中泄漏噪声的声音传播分析。绘图显示了泄漏点周围区域的声压。

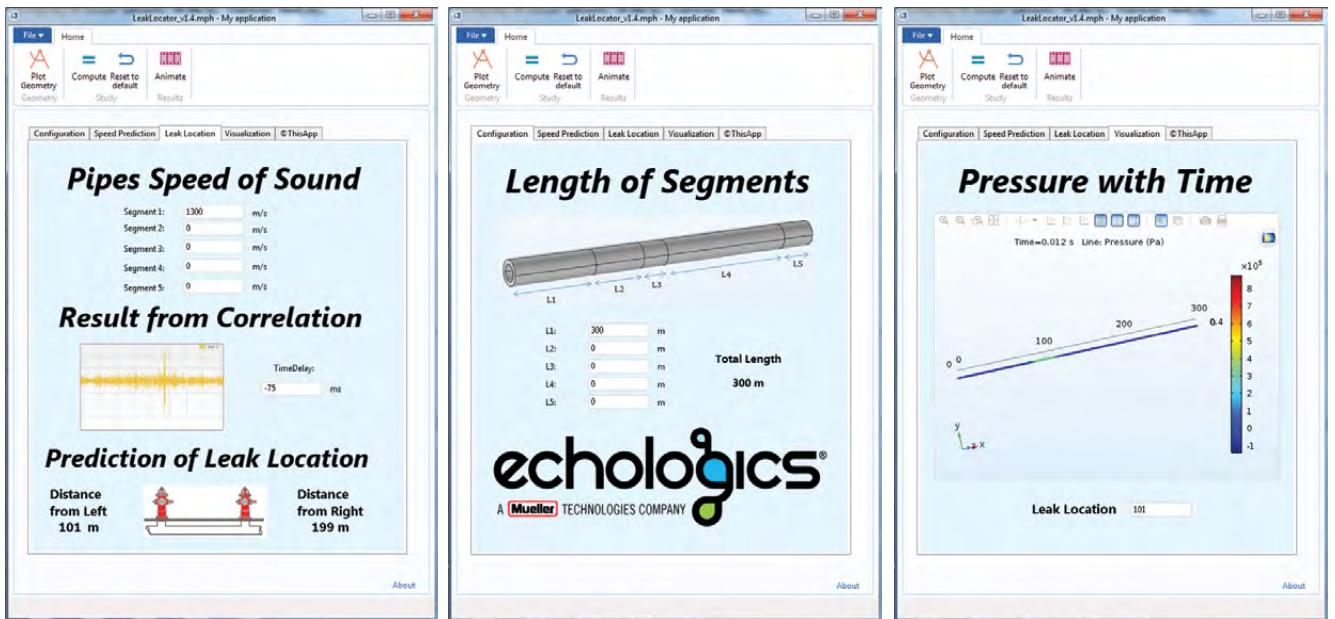


图 5. 用户可通过简洁易用的操作界面对几何结构和管道特性进行定义,从而推测准确的泄漏位置。此 App 可用于计算管道中的声速,还可以将泄漏位置的声音传播制作成动画,同时无需将声-结构相互作用和位置预测涉及的复杂计算呈现给用户。

对 App 进行更新,同时还兼顾了保密性。由于 Perrier 的大部分工作内容都需要保密,因此保密性对他来说十分重要。此外,仿真 App 还使得现场的工程师可以实地运行测试分析。

Perrier 期望仿真 App 未来能在 Echologics 公司得到更加广泛的应用。对

于 Echologics 的现场工程师而言,App 的关键优势在于,无需详细了解仿真背后的力学或数学知识,就能够快速准确地发现泄漏点。在 Perrier 的眼里,这一强大的仿真工具可以直观呈现声音的传播过程,让使用者看到当几何结构和材料属性发生变化时,声速是在减小还是在增加。❖



Sebastien Perrier, Echologics 公司声学领域的研发科学家。

# 利用虚拟样机改进电子液压助力转向系统

FZB 科技公司利用多物理场仿真技术指导电子液压助力转向系统的设计改进。

作者 **LEXI CARVER**

如果您曾经驾驶过没有配备助力转向系统的汽车，一定有过费力转动方向盘来带动轮胎以控制汽车行驶方向的糟糕驾驶体验。幸运的是，助力转向系统的诞生让那些苦日子一去不复返。助力转向系统通过转向齿轮让驾驶员能够轻松地掌控方向。多年来，助力转向系统经历了多次产品更迭，其性能随着设计的改进变得越来越强大。

直至上世纪九十年代，液压和电动助力转向一直是应用最为广泛的两种助力转向系统。随着技术的发展，在这两项技术的基础上发展出了一种更为节能的解决方案——电子液压助力转向 (electrohydraulic power steering, 简称 EHPS)。EHPS 系统保留了传统的液压装置，并使用电动机为液压泵提供动力 (图 1)，而不是汽车的发动机。由于电机的输出可以根据方向盘的角度和车速进行调整，因此大幅降低了能量损耗。

当驾驶员转动方向盘时，液压泵将液体从储液罐输送到转向齿轮，转向齿轮会施加额外的扭矩来带动轮胎。除此之外，电子液压助力转向系统部件还包括电子控制单元 (electronic control unit, 简称 ECU)、扭矩传感器、流体压力控制阀和管路。

## ⇒ EHPS 的复杂之处

助力转向系统内相互关联的部件非常多，一个零件的响应往往依赖于另一个零件，因此设计工作十分复杂。任何一个看似微小的调整都可能对正常的功能、效率和可靠性带来重大影响。

“多物理场仿真可以加速设计的优化过程，” Steven Qi 解释道。Qi 是美国密歇根州普利茅斯市的 FZB 科技公司的项目经理，并从事机械工程方面的研究。FZB 公司的主营业务是为汽车市场提供研发服务，领域涵盖电机、传感器、基于 RFID 技术的无钥匙点火系统以及 EHPS 系统。

FZB 的工程师经常使用 CAD 工具和 COMSOL Multiphysics® 软件对 EHPS 部件进行模拟 (图 2)。这种分析方式可以帮助他们更好地了解系统内部的运行特性，从而在进行实际的物理测试之前，使虚拟设计尽可能地接近最终成品。

“仿真能够帮助我们清晰、全面地理解问题，进而让我们在制作产品的物理样机前就能满足汽车的各项设计需

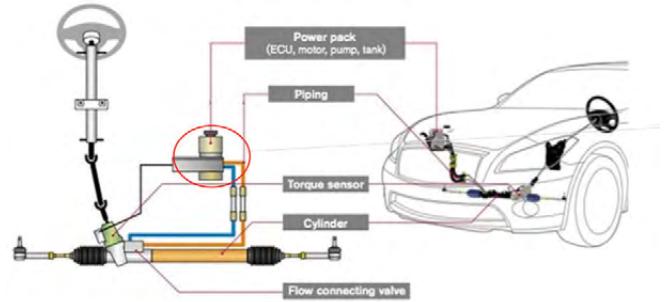


图 1. 电子液压助力转向 (EHPS) 系统示意图。图注: Power pack - 动力单元; ECU - 电子控制单元; motor - 电机; pump - 泵; tank - 油箱; Piping - 管路; Torque sensor - 扭矩传感器; Cylinder - 油缸; Flow connecting valve - 流体连接阀

求。” Qi 解释道，“在对系统的改进过程中，我们需要了解系统在力学、热力学、流体、声学 and 电磁等各方面的性能表现。”

物理测试和验证既昂贵又耗时，所需时间甚至可能长达六个月。然而，即使物理样机成功通过了测试，其设计仍需进一步优化。“冗长的测试过程会大幅延长设计周期，所以我们特意引入了仿真分析来加速设计进程。我们在和克莱斯勒 (Chrysler) 公司合作时，会定期地与他们的工程师进行沟通，确保每次进行物理验证之前都能够在

COMSOL 软件中对设计进行改进。否则我们将很难满足用户提出的需求。”

为了深入研究引擎盖下各部件的性能表现，Qi 带领 FZB 公司的研发团队对新型 EHPS 设计的主要部件进行了模拟，其中包括 ECU、隔离安装支架、永磁电机、储液罐和斜齿轮泵。团队不仅模拟了每个零件，而且还针对不同车型设计，对整个复杂的装配体进行了多物理场分析。

这些热、力、流体和电磁现象的分析数据为研发团队提供了可靠的依据，帮助他们快速解决了与热性能、动态

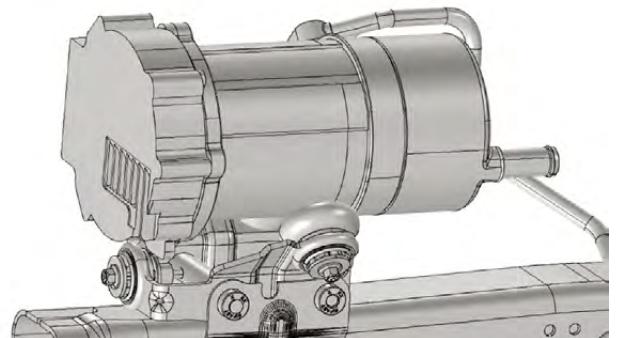


图 2. 用于 EHPS 设计分析的多物理场几何模型。其中包含可向周围空气传热的翅片、安装部件以及流体端口。

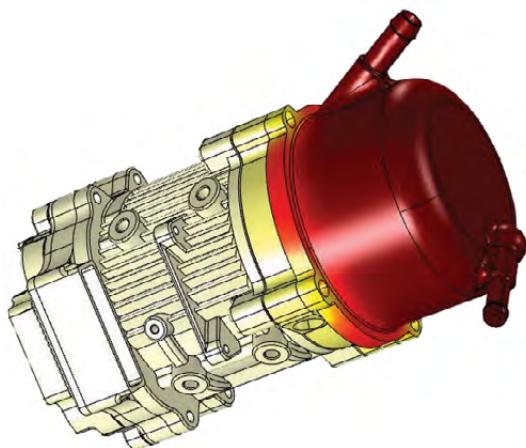


图 3. 研发人员执行了稳态仿真和瞬态仿真, 在不同车辆载荷下的泵测试中, 对不同零件的温度分布进行了测量。仿真结果显示了局部几何结构、电机设计参数、ECU 通孔尺寸和数量以及其他导热特性的理想范围。

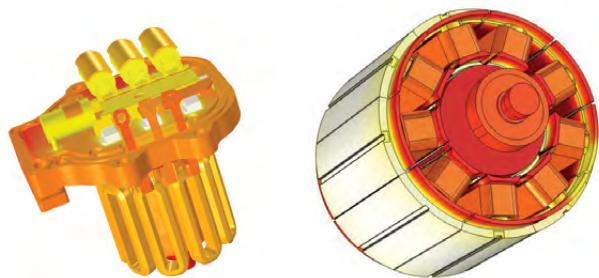


图 4. ECU 和转子总成(左图), 以及定子和转子组件(右图)的温度。此模型预测了当产品安装在车辆上时的系统热性能。

运动控制、泵内液体输送, 以及噪声、振动和声振粗糙度 (noise, vibration, and harshness, 简称 NVH) 相关的问题 (图 3)。

### ⇒ 引擎盖下的发热问题

能够在安全的温度范围内正常运行是助力转向系统设计中考虑的一个重要因素。Qi 创建了一个可以分析泵内传热和转向齿轮润滑油发热的模型。研究团队使用流体温度作为可变的边界条件, 从而可以对不同运行环境下系统的温度分布进行预测。

Qi 解释说, 当车轮被路沿卡住, 而驾驶员试图转动轮胎时, 泵承受的应变将达到最大。如果在现实中发生此类情况, 即使车轮被卡住, 汽车的电池仍然会向泵输送电能, 这会导致 ECU 和电机磁体发热。

研发团队基于汽车制造商提供的运行条件, 对动力转向液在上述情景下的性能表现进行了模拟。此外, 他们还研究了在车轮被锁定的情况下, 转向系统内产生的热量对 ECU 组件温度的影

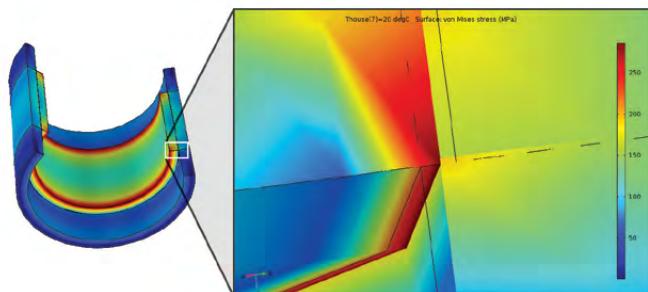


图 5. 仿真分析了外壳和定子过盈配合的应力水平。

响, 这些 ECU 组件包括金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOS-FET) 和线束等。他们采用了多尺度建模的方法, 首先对单个组件进行仿真, 之后将各个仿真集成为完整的系统, 并将仿真结果与实际的测试数据进行了相关性分析。在分析中, 他们可以通过调整边界条件和材料属性对各类配置的优缺点进行探究。

温度分布也会对电机的外壳、定子、转子和杆等结构部件产生影响 (图 4)。金属的热膨胀现象会影响电机的效率, 因此需要更大的扭矩和转速来满足泵功率输出的需求。动力粘度和密度等流体属性也会随温度而变化, 因此需要不断调节齿轮, 才能保持平稳、连贯的操作。

“当车辆停止不动时会迫使泵做大量额外功, 这种情况是我们面临的巨大挑战。” Qi 说道, “我们不希望零件因为工作温度过高或过低而出现故障, 因此对现实中可能出现的各种极端状况进行了模拟, 以确保系统在极端情况下依然能够稳定运行。”

Qi 对热膨胀引起的电机、定子和泵等部件的壁厚变化进行了模拟, 目的是确认零件中的应力水平不会超过其屈服应力 (图 5)。

电机的定子给研发团队提出了一个特别的挑战: 热膨胀问题可能会致其失效。幸运的是, 研发团队在初期阶段便从 COMSOL 仿真结果中推断出了这一问题, 他们在设计中增加了一个凹槽, 从而避免在定子形状改变时出现问题。

当需要考虑电机外壳和定子的过盈配合及过盈量时, 上述的几何因素便至关重要。这是因为外壳和定子具有不同的热膨胀系数 (将导致受热时变形的不同), 因此研发人员需要仔细选择过盈量和几何厚度, 确保外壳和定子都不会在工作温度范围内失效。

### ⇒ 流体、噪声和电子设备: 一个因素都不能少

FZB 的研发团队还建立了一个电磁模型, 用于分析螺旋磁体

“一款车型从概念设计到成功面市, 涉及了多方面的因素, 整个设计周期的时间安排非常紧张, 能够实现跨学科团队合作的多物理场工具正是我们需要的。”

— STEVEN QI, FZB 科技公司  
项目经理

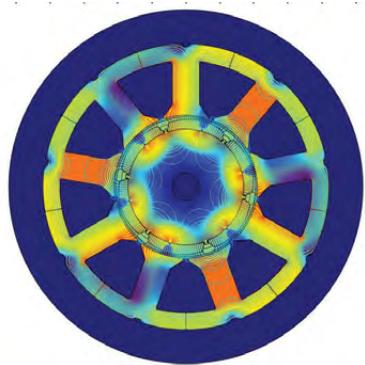


图 6. 仿真显示了 EHPS 电机性能瞬态研究中的磁通密度和磁矢势。

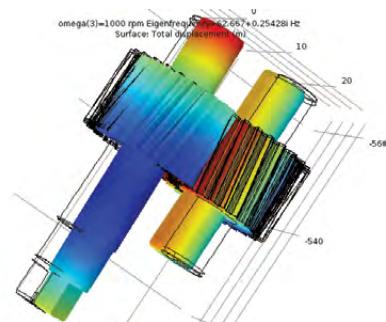


图 7. COMSOL 仿真结果显示了当转速为 1000 RPM 且特征频率为 2718.2 Hz 时斜齿轮的位移, 上述结果是在导入 PumpLinx® 软件中的流体分析数据后得出的。

WORKS® 软件对几何模型进行更新。接着, 他创建了一个声学仿真来研究泵在输送过程中的振动情况(图 7~8)。此外, 他使用转子动力学仿真确定了泵的临界速度。当泵的转速达到临界速度时, 振动会急剧增加, 致使传动装置失效, 并发出异响、降低系统效率。

“我们不仅需要了解系统的噪声会有多大, 还要知道它对电磁和流体特性的影响。” Qi 解释道, “这些现象是相互关联的。我们模拟了流体的压力脉动, 随后在 COMSOL 中分析了脉动对空传噪声的影响。根据模拟结果, 我们有信心能对轴承、传动轴, 以及斜齿轮和斜齿轮泵衬套内流体压力释放槽的形状进行优化。”

### ⇒ 为 EHPS 的优化工作铺平道路

最终, FZB 团队基于 COMSOL 的计算结果, 对泵的几何结构设计提出了大量有效的改进方案。他们还根据仿真结果生成了一个关于功耗限制的报告, 可帮助工程师优化设计方案, 以满足汽车各方面的设计要求。此外, 他们还研究了不同的边界条件对能量消耗和泵功率输出的影响, 并将不同场景的模拟结果和

和斜齿轮泵在泵送过程中不同时间步长下的性能(图 6)。仿真结果向他们展示了电机随着时间变化的性能表现, 不仅如此, 模型还准确计算出了线圈和铁芯上的热损失。基于这些信息, 研发团队对几何结构进行了调整, 使零部件中的温度分布更加均匀。

为了能够更加准确地了解电磁对流体输送和泵效率带来的影响, 研发团队结合了电磁仿真与 CFD 分析。团队在研究中使用了专门用于泵建模的 PumpLinx® 软件, 用于获得流体效率、流量和压力脉动等数据。

Qi 将流体数据导入自己的 COMSOL Multiphysics® 模型中, 并通过 SOLID-

实际驾驶测试数据进行了对比验证。

Qi 总结道: “之所以会选择 COMSOL 软件, 是因为我们需要对所有耦合的物理现象进行分析。一款车型从概念设计到成功面市涉及多方面的因素, 整个设计周期的时间安排非常紧凑。一款真正能够实现跨学科团队合作的多物理场工具正是我们需要的。COMSOL 软件的强大之处在于能将带有

不同边界条件的多个物理场耦合在一起, 帮助我们准确地预测了 EHPS 设计的性能表现。” ❖

### 参考文献

1. Qi, F., Dhar, S., Nichani, V., Srinivasan, C. et al., "A CFD study of an Electronic Hydraulic Power Steering Helical External Gear Pump: Model Development, Validation and Application," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.

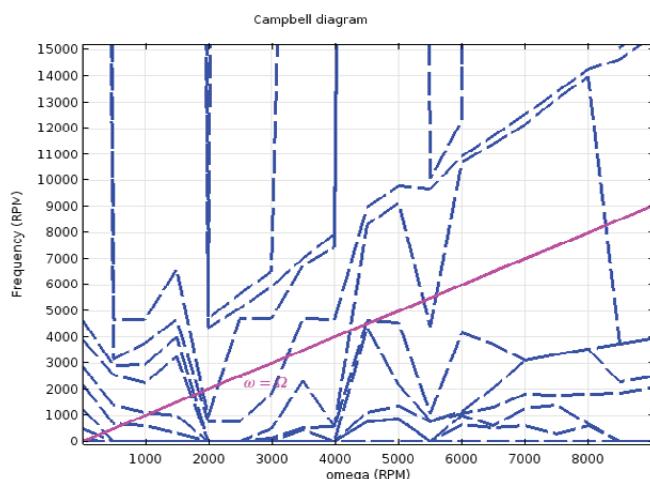


图 8. COMSOL 软件生成的坎贝尔图显示了特征频率随斜齿轮角速度的变化情况。



上排从左到右依次为: FZB 公司 CEO Jinming Yang, 总监 Zhonghui Bing, 项目经理 Steven Qi。

下排从左到右依次为: FZB 公司经理 Liang Yang; 中国阜新德尔汽车部件股份有限公司执行总监 Dahong Yu, 经理 Ying Xie。

# 加工过程中的热量会损坏电池吗?

研究人员借助数值仿真对高端电池系统制备过程中锂离子电池单元的堆叠展开了探索。

作者 **JENNIFER HAND**

**锂**离子 (Li-ion) 电池的工作温度会对其性能和耐久度产生巨大的影响, 具体表现为低温会导致性能下降, 高温会导致电池迅速降解。因此, 无论温度过高还是过低, 电池的整体可靠性都会受到影响, 进而可能造成安全隐患。

目前工业界针对电池在工作状态下可承受的温度变化范围, 已经制定了专门的标准。然而对于电池在制造过程中所经历的各种高温环境, 却并未受到过多的关注。在电池的制造过程中, 等离子体预处理、UV 固化、激光焊接、超声波接合、热堆积和热胶合等环节都可能带来隐患。锂离子电池中包含了数千个堆叠在一起的电池单元, 其组装流程涉及了各类热处理工艺, 部分工艺的操作温度极高, 能够在短时间内使电池壳体或其他元件暴露在高温中。

Gerd Liebig 是位于德国奥登堡大学的 NEXT ENERGY EWE 能源技术研究中心的研究人员, 他解释道: “众所周知, 焊接等工艺流程会使电池内部的温度大幅升高, 然而我们尚不清楚这种高温在电池内部的传播情况, 以及对电池单元造成的损害程度。”

奥登堡大学的 Pamina Bohn 博士和 NEXT ENERGY 的科研人员展开了密切的合作, 开始研究电池的制造过程是否会引发电化学降解反应, 从而影响电池的稳定性和容量, 造成不可逆的损害。若采用实验方法进行研究, 不仅要提供严密的安全预防措施, 同时还需要投入大量的时间和费用, 因此他们决定利用数学模型来进行验证。研究团队借助数值仿真对不同的电池工作场景进行了研究, 并在模型中添加了探针, 以获取任意点的检测数据。这样的研究效果是物理实验无法达到的。

## ⇒ 设计热应力实验

研究团队首先建立了物理实验, 对仿制棱柱形锂电池单元在短时间内受到热应力后可能达到的温度进行了测量。实验的目的是收集用于验证数学模型的数据, 并对电池单元制造过程中的各类影响因素进行研究。电池单元的组件包括双面涂层阳极材料、双面涂层阴极材料以及一层夹在中间的聚烯烃隔膜纸, 三层材料是卷起来的, 这种结构俗称“绕卷”(jelly roll)。研究人员使用有机溶剂作为电池电解质, 将绕卷浸于其中, 并在电池单元上放置了八个温度传感器: 三个在绕卷结构中间, 三个在电

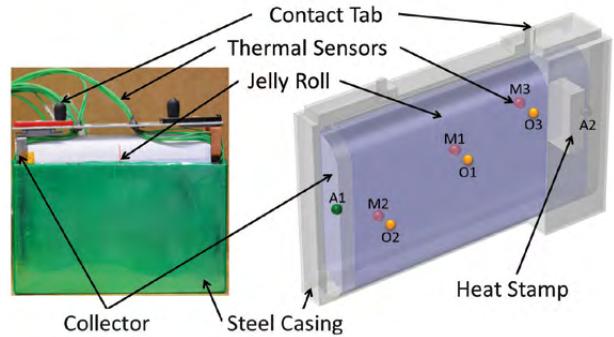


图 1. 左图: 仿制棱柱形锂离子电池单元。右图: 用于模拟电池单元的 CAD 几何模型。该电池单元配有八个温度传感器, 它们分别是: 置于绕卷结构表面的 O1、O2 和 O3; 在绕卷结构的中间的 M1、M2 和 M3; 连接到集流体的 A1 和 A2。研究人员在 COMSOL® 模型中的相同位置定义了探针。图注: Contact Tab – 接触极耳; Thermal Sensors – 热传感器; Jelly Roll – 绕卷; Collector – 集流体; Steel Casing – 钢质外壳; Heat Stamp – 热源

池单元绕组的表面, 另外两个分别放置在了阳极和阴极的铜、铝集流体上, 这些传感器又被称作避雷器(图 1)。

## ⇒ 模拟热行为

研究团队还以商业化的棱柱形锂电池单元为原型, 在 Autodesk® Inventor® 软件中创建了三维模型, 并将它导入 COMSOL Multiphysics® 软件中。他们针对不同的制造工艺, 模拟了电池单元表面不同区域由外部热源引起的传导传热, 同时还对其他区域的自然对流冷却进行了模拟。

各类材料的物理性质和热性能均已在实验中得到了确认, 随后研究人员在数学模型中将各类材料均质化为单个绕卷结构, 同时添加了一个棱柱形的钢质外壳。“由于电池单元组件具有各向异性, 模型需要兼顾热力学参数的方向性。” Liebig 向我们解释道。

在仿真中, 矩形热源的位置与物理实验中的热源完全对应。图 2 显示了在电池单元表面上添加热源 60 秒后的温度分布情况。研究人员在温度梯度较高的区域应用了自适应网格细化技术, 由此获得了更精细的离散效果, 确保了计算结果的高度准确。

## ⇒ 寻找损坏的迹象

多物理场模型的结果与仿制电池单元的实验结果基本接近。对模型进行验证之后, 团队成员便针对不同的制造工艺开始模拟温度在电池单元内的传播情况。

图 3 的结果显示了施加 1100 °C (常用的焊接温度) 的温度荷载 4 秒后, 极耳表面的温度分布情况。热量扩散到电池单元中, 致使温度升至 100 °C 以上。即使移除外部热源, 电池单元内部温度仍将继续上升, 在外界加热结束后的 4 秒内, 绕卷结构内的温度达到了 138 °C。

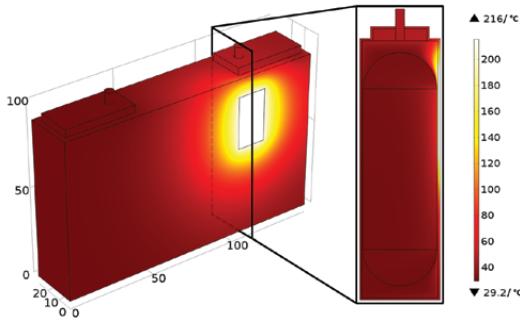


图 2. 数值结果显示了将 50 W 的热量施加在电池单元壳体表面 60 秒后的温度分布。

Bohn 指出：“这么高的温度会引起电池发生不可逆转的损坏，例如造成电解质的分解，这是因为电解质对高温极其敏感，同时电解质的分解还会改变固体-电解质界面处的特性。这些影响不仅会致使局部的材料损坏，还会导致电池总容量下降，以及电池内阻的升高。”

### ⇒ 输送能量又不损坏电池

团队的下一项研究是证实可以利用高功率密度的激光束实现高速焊接，同时还能限制传输到电池单元中的热量。激光焊接

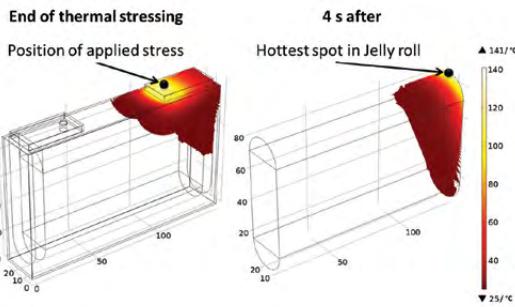


图 3. 仿真结果显示了在 1100 °C 下进行极耳焊接后的温度传播情况。其中左图为施加加热应力 4 秒后的温度分布，右图为移除热源 4 秒后的温度分布。



Gerd Liebig 和 Lidiya Komisyyska, NEXT ENERGY 研究中心。

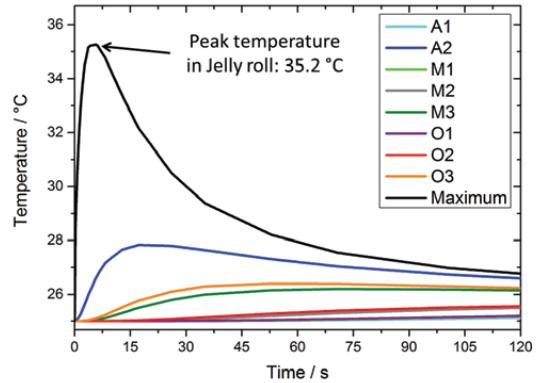


图 4. 仿真结果显示了施加 1100 °C 的热应力 0.2 秒后的探针温度曲线。

技术的效率极高，并且得益于光束的高功率密度，该技术可以被应用于多种类型的金属。

为了对激光焊接进行模拟，研究人员在极耳表面施加了 0.2 秒的 1100 °C 的温度载荷（图 4），并由此确定了沿电池单元壳体传播的热量不会导致温度升高超过 36°C。该温度处于适中水平，因此并不会给电池组件带来损害。将绕卷的温度分布模拟结果与对 26650 锂离子电池单元进行数秒激光焊接后得到的热成像图进行对比，可以发现，二者完美匹配。

### ⇒ 未来的研究基石

Liebig 评论道：“COMSOL Multiphysics 是一款值得信赖的仿真工具。它不仅拥有直观的操作界面，还提供了很多实用的工具，从材料选择到边界条件，都能满足我们的需求。COMSOL 软件的灵活性，以及内置的各种物理场接口和几何工具，为我们的研究节省了大量的时间。”

研究团队的其他成员也对此深有同感，他们总结道：“电池的应用领域极为广泛，型号和种类也非常多，因此要找到一个材料、尺寸或形状完美的电池是不可能的。然而，我们的模型为未来的电池研究提供了广阔的空间。借助数值仿真，我们可以方便地修改电池的几何结构、应用领域和制造材料，同时也让我们对未来的锂电池研发工作充满信心。” ❖

### 参考文献

1. G. Liebig, P. Bohn, *Temperature Propagation and Effects by Short-Term Thermal Stressing of Lithium-Ion Cells*, *Battery Safety Conf.* 2015.
2. P. Bohn, S. A. Garnica Barragan, L. Komsiyyska, G. Wittstock, *Performance and the characteristics of thermally stressed anodes in lithium ion cells*, *Journal of The Electrochemical Society*, 162 (2) (2015).
3. P. Bohn, G. Liebig, L. Komsiyyska, G. Wittstock, *Temperature propagation in prismatic lithium-ion-cells after short term thermal stress*, *Journal of Power Sources*, Volume 313, 1 May 2016.
4. M.J. Brand, P.A. Schmidt, M.F. Zaeh, A. Jossen, *Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances*, *J. Energy Storage* 1 (2015).

# 站在助听器研究领域的前沿

美国楼氏电子公司的工程师与助听器行业展开合作, 期望借助多物理场仿真消除助听器的声反馈现象。

作者 **GARY DAGASTINE**

据报道, 美国总人口中有近 20% 在听力方面存在障碍, 并且实际比例可能会更高, 这是因为很多患者不愿意承认自己患有听力障碍。听障人士需要依靠微型助听器来改善自己的听力水平和生活质量。一款助听器产品从最初的设计阶段到最终面市, 离不开大量的研发工作。

工程师在助听器的设计过程中经常会遇到大量的技术难题, 声反馈 (Feedback, 又称啸声) 是其中最主要的一个。这种现象不仅会产生尖锐的啸叫声, 同时还会限制助听器的增益效果。Brenno Varanda 是位于美国伊利诺伊州艾塔斯卡 (Itasca, IL) 的楼氏 (Knowles) 电子公司的高级电声工程师。他解释说: “当本应向耳道内传递的声音或振动被助听器的麦克风接收后, 经放大器回传, 便会产生不必要的振荡, 这种现象就是声反馈。”

Varanda 接着解释道: “对楼氏电子的客户而言, 设计一款新型的助听器不仅费用高昂, 通常还要耗费 2~6 年的时间才能完成。” 准确的模拟可以帮助设计人员选定扬声器型号、改进隔振装置以及封装组件, 并能让麦克风尽可能少地接收到从扬声器发出的能量。因此助听器行业迫切需要能够加速研发的简单换能器模型, 来帮助他们为消费者提供更多的高质量产品。然而完整的扬声器和麦克风模型结构十分复杂, 而且还包含了许多与反馈控制无关的因素。Varanda 表示, “作为换能器的设计者, 我们必须清楚地了解产品涉及的电磁、力学和声学物理场, 但这些复杂的物理原理对于客户

来说却不是必要的。”

作为全球领先的助听器换能器、智能音频设备和专业声学元件供应商, 楼氏电子从多方面入手, 希望开发出易于应用并能与客户产品兼容的换能器声振模型。这些模型的作用是让助听器的设计者在不牺牲产品性能的前提下, 以更高效的方式将原型机转化为最终产品。

## ⇒ 助听器的设计和声反馈

在助听器的设计工作中有两个相互冲突、却又不得不同时考虑的需求: 助听器既要小巧隐蔽, 又要能够提供强劲的声音输出以弥补佩戴者的听力损失。用户更加喜欢佩戴轻巧、不易被发现的助听器, 然而这将进一步增加声反馈问题的解决难度。Varanda 补充道, “助听器设计中的一个常见难题是如何在确保声反馈可控的前提下, 将所有元件塞到尽量小的空间内。”

一个典型的小型耳背式助听器的元件包括可将环境声音转换为电信号的麦克风、用于处理电信号的数字信号处理器、用于放大电信号的放大器, 以及微型扬声器 (即受话器) (图 1)。受话器“接收”到经过放大的电信号后, 将其转换成声能或声音, 然后声音会经由管道或耳模 (一种在耳内用于传导声音的装置) 进入耳道。

受话器中有一个被称为簧片的电磁控制杆, 与振膜相连接, 而振膜通过振动就能产生声音。受话器内部的机电力会产生反作用力, 并通过助听器装置向外传递振动, 产生的声音会被麦克风捕获。随

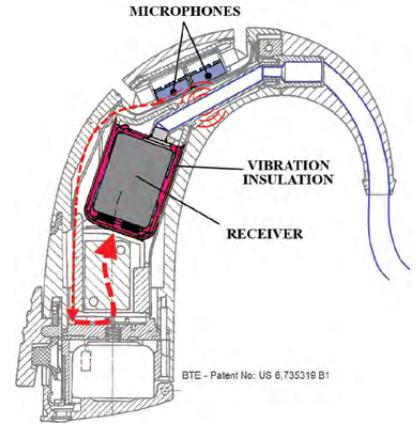


图 1. 标准的耳背式助听器由麦克风、隔振装置、受话器等元件组成。由于元件布局过于紧凑, 容易产生负面的声学 and 力学反馈。图片由楼氏电子公司提供。图注: MICROPHONES - 麦克风; VIBRATION INSULATION - 隔振装置; RECEIVER - 受话器

后, 声音信号再次被麦克风中的放大器放大, 并传递回受话器中, 从而引起声反馈。该路径如图 1 所示。

## ⇒ “黑盒子”模型

受话器只有一个作用: 把麦克风放大的电压信号转换为声音。虽然它的结构看似很简单, 但实际转换过程却相当复杂 (图 2)。电信号在被转换为声信号之前, 首先会依次转换为磁信号和机械信号。每一个转换步骤均有各自的频率相关特性。了解所有内部组件的综合效应, 对受话器的设计工作来说至关重要。自

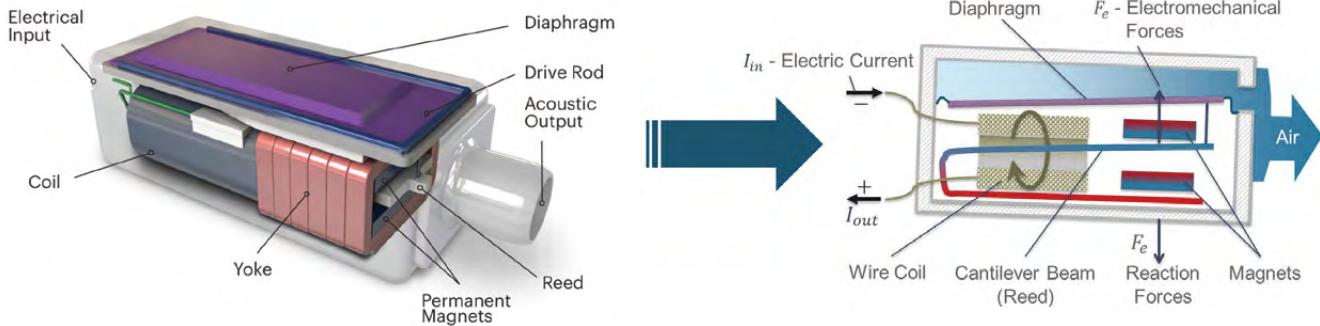


图 2. 受话器是助听器中的关键元件, 它包含一个微型扬声器, 扬声器中的电磁控制振膜可以产生声音。受话器内部的电磁力会引起结构振动, 进而产生力学反馈。图注: Electrical input - 电输入; Coil - 线圈; Yoke - 磁轭; Permanent magnets - 永磁体; Reed - 簧片; Acoustic output - 声能输出; Drive rod - 驱动杆; Diaphragm - 振膜; Electric Current - 电流; Wire Coil - 线圈; Cantilever Beam - 悬臂梁; Reaction Forces - 反作用力; Magnets - 磁铁; Electromechanical Forces - 机电力

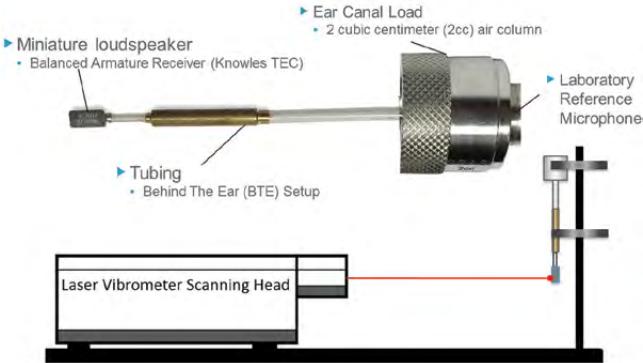


图 3. 实验装置的硬件和原理图。图注: Miniature loudspeaker - 小型扬声器; Balanced Armature Receiver - 平衡电枢受话器; Tubing - 导音管; Behind The Ear (BTE) Setup - 耳背式 (BTE) 助听器装置; Laboratory Reference Microphone - 实验室标准麦克风; Ear Canal Load - 耳道负载; 2 cubic centimeter air column - 2 立方厘米的空气容积; Laser Vibrometer Scanning Head - 激光测振仪扫描头

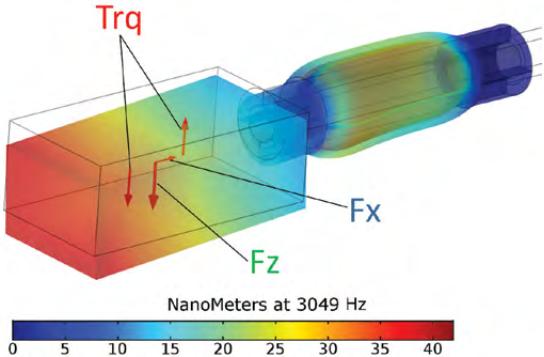


图 4. 受话器和硅胶导管配件在 3 kHz 频率下, 力和位移的仿真结果。单位为纳米。

20 世纪 60 年代起, 楼氏电子的工程师一直在使用复杂的等效电路方法对助听器内部的所有电磁-力学-声学效应进行模拟。

为了准确模拟受话器中复杂的物理现象, 设计人员需要一个极为庞大、复杂的多物理场有限元模型, 因此难以实现快速高效的助听器设计。Daniel Warren 博士是助听器行业的专家, 主要从事受话器和麦克风的研究, 他在 2013 年推出了“黑盒子”模型。这一模型采用了尽可能少的简单电路元件, 并获取了平衡电枢

受话器中电压和输出声压级之间的基本电声传递函数。模型中剔除了那些与反馈控制无关的因素。

Warren 和 Varanda 向我们演示了简化模型的一个关键步骤: 在几乎不增加复杂度的前提下, 将简化的电声电路转换为强大的声振模型。Warren 解释道, “转换是通过探测部分‘黑盒子’电路来实现的, 在这段电路中, 电感器两端的电压与产生结构振动的内部机械力成正比。”

在“黑盒子”和声振模型被应用于产品设计前, 设计人员需要参照实际受话器

的声学 and 机械装置对模型进行测试和验证。早在 2014 年, 楼氏电子公司就开始在全球范围和许多助听器行业的客户展开了合作, 希望借助 COMSOL Multiphysics® 软件和行业标准测试对这一模型进行验证。

⇒ 合力完成验证工作

为了验证模型, 工程师需要同时测量声输出和振动力, 而所使用的测试结构要能够方便地用有限元方法进行分析。与常规的助听器测试一样, 该测试将受

话器连接到一小段导音管上，导音管的另一端连接到体积为2立方厘米的封闭空腔中（标准的人耳道声负载测试），如图3所示。空腔内声压的测量使用了实验室级的麦克风。为了验证模型的稳健性，研究人员采用了与耳背式助听器相似的复杂导音管装置来测量受话器。在此项设计中，导音管的直径可以发生变化，其长度足以支持多次声共振。在测量声能输出的同时，研究人员利用激光测振仪来捕获了受话器的结构运动。他们还通过观察受话器外壳表面多个点上的运动，对平移和旋转运动进行了测量。

Warren 和 Varanda 与楼氏电子的多家客户合作，顺利完成了上述测量任务。在 COMSOL Multiphysics 的帮助下，他们将简化的声振电路模型引入到了上述测试装置的仿真模型中。仿真耦合了受话

器和与之相连的硅胶导管之间的力学相互作用、导音管各段横截面内的热粘性损耗、腔体和管道内的声压载荷，以及“黑盒子”受话器模型内部的电磁-声学效应。

COMSOL 模型计算出了输出声压级、机械力与外加电压、频率和材料属性之间的依存关系。图4显示了3kHz时的位移仿真结果，以及受话器上承受的作用力。

Varanda 将仿真结果与实际测量数据进行了比较，二者完美契合（图5）。结果表明，施加在振膜和簧片上的力取决于输出声压，然而，作用在振膜上的力与结构受到的反作用力之间被证明是成比例的，这与研究人员的预期相符。

#### ⇒ 传播知识，共享智慧

楼氏电子将模型分享给了其他助听器公司的工程师，帮助他们解决各自系统的声反馈问题。通过对硬件内部的声学、力学和电磁行为进行全面的表征，设计人员可以自由地对产品进行虚拟优化。

Varanda 表示：“COMSOL 是为数不多的能将‘黑盒子’受话器的集总电路与声学和固体力学相耦合的建模仿真工具之一。与其说对助听器设计的验证和优化是科学研究，倒不如说是一种艺术创作。我们非常希望这些模型能够助力新型助听器的研发。”

助听器行业的所有从业人员都能受益于这种跨企业的协作方式。“助听器设计人员不想把精力浪费在复杂的换能器模型和耗时的仿真中。他们只想专注于手中的设计工作，通过更换不同型号的换能器来探究这些元件是如何协同工作的。” Varanda 补充道，“COMSOL 模型让设计人员的愿望变成了现实，他们可以轻而易举地在一款助听器装置中对比上百种换能器的性能。”

借助多物理场仿真，助听器的设计者现在能够以一种更好、更快、更经济的方式减少声反馈，并改善助听器的整体性能，进而为听障人士提供更多贴合需求的选择。❖



Brenno Varanda, 楼氏电子公司的高级电声工程师。

借助多物理场仿真，助听器的设计者现在能够以一种更好、更快、更经济的方式减少声反馈，并改善助听器的整体性能，进而为听障人士提供更多贴合需求的选择。

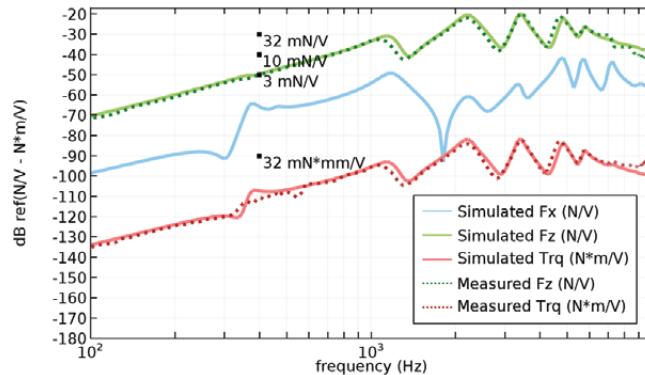
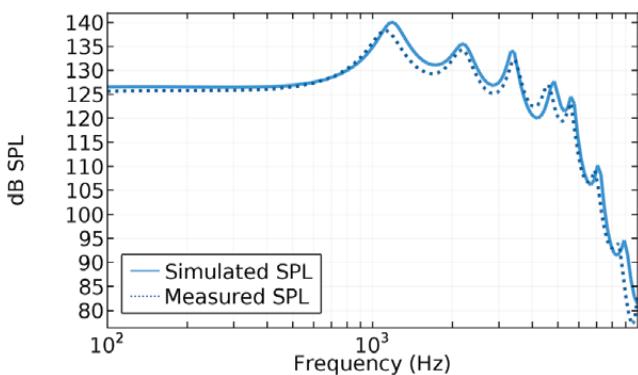


图5. 左图：体积为2立方厘米的耦合器内的声压级测量数据（虚线）和仿真结果（实线）。右图：在受话器上的力和扭矩的测量数据（虚线）与仿真结果（实线）。

# 找出卫星系统中的电弧区域

卫星在轨道中运行时会发生电弧放电, 这种现象可能导致系统故障, 但对其进行预测却极为困难。俄罗斯强电流电子学研究所的工程师借助多物理场软件, 找到了故障最初发生的临界区域, 从而为机载设备提供了及时的保护。

作者 **GEMMA CHURCH**

波音卫星系统 (Boeing Satellite Systems) 公司在 1995 年推出了一系列新型的通信卫星平台 (satellite buses), 平台包含电力系统、控制系统和推进系统。研发人员将高压母线与 100 V 的稳定电源相连接, 取代了原先 27 V 的标准电压。这一全新的配置通过增加工作电压降低了工作电流, 并相应地减少了导体中的电阻损耗。然而这一改进却给卫星的电气系统带来了潜在的灾难性故障——电弧 (图 1)。

位于俄罗斯托木斯克 (Tomsk) 的强电流电子学研究所 (Russian Institute of High Current Electronics) 的研究员 Vasily Kozhevnikov 解释说: “新的工作电压标准导致电路板上的元件之间可能会产生电弧现象。当初在设计中为了尽可能地减轻卫星的质量, 并没有在电路板机箱的内部空间填充绝缘体, 也没有将内部空间建造为真空环境。然而, 这种设计却可能导致电弧放电或放电连锁反应, 从而影响到大量的机载设备。”

“车载卫星系统内的电弧现象通常会

导致局部或整体故障。在大多数情况下, 这些故障会导致卫星报废。”他补充道。

这项研究与极端条件下的气体放电现象密切相关。在极端条件下, 电气设备的运行并不会完全遵循常规的物理原理。举例来说, 放电有时会发生在阈值 (通常被称为 Paschen 最小值) 之下, 这时的电压较低, 通常并不足以在两个电极

之间引发放电或电弧。

Kozhevnikov 表示, “我们认为, 这项研究将来可以用于诊断压力、电离水平等各类外部参数对电气设备运行状况的影响。除航天工业和太空科学之外, 此项研究还具有更为广阔的应用前景。”

随着电气系统越来越多地应用于极端环境, 电弧已不仅仅是民用航天工业面临的问题, 它将影响到所有需要长时

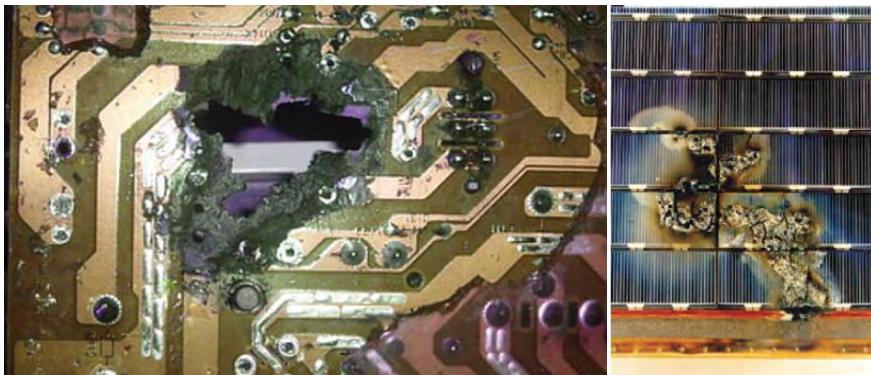


图 1. 工作电压为 100 V 的电源中因电弧造成的损坏。

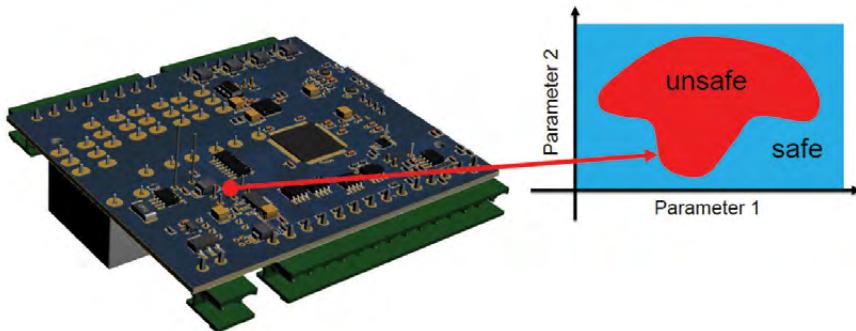
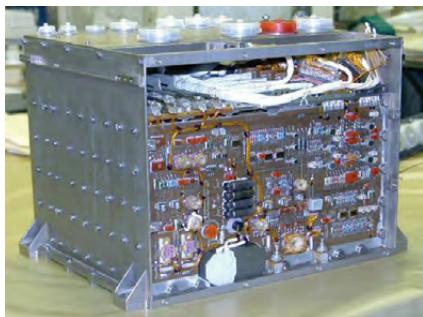


图 2. 卫星设备专用电路板示例图。临界区域的宽度不足 5 mm。强电流电子学研究所的工程师必须确定不安全的工作条件范围以及相关特性, 并据此来设计能够在卫星上运行且不易遭受破坏的系统。

间自动运行、且对容错能力要求高的电气设备。因此，电弧问题解决方案的适用范围已从太空中的卫星延伸到了地面系统和水下设备。

### ⇒ 寻找临界区域

为了防止自持电弧破坏机载电气设备，就必须确定发生自持放电的区域，即所谓的“临界区域”。一旦找到了潜在的问题区域，工程师便可进一步对触发电弧放电的原因进行研究。

实验室研究无法完整复现空间轨道内的运行参数范围，因此无法胜任识别电子热区这一任务。仿真，作为唯一可选

“在 COMSOL 的帮助下，研究人员无需再自行编写计算代码，便能够顺利地执行研究。我们期待这款软件未来能在气体放电研究中发挥更大的作用。”

— VASILY YU. KOZHEVNIKOV, 强电流电子学研究所助理研究员

的研究工具，也依然面临着巨大的挑战。一台常规的机载电气设备通常安装有多块印刷电路板，这些电路板被置于金属外壳之中，并分布在大片区域内（图 2）

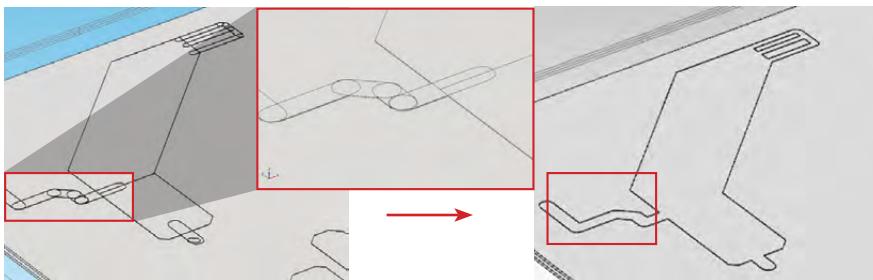


图 3. COMSOL 软件的几何修正功能。

。Kozhevnikov 解释说：“对放电现象进行数值仿真分析是识别潜在自持放电区域的唯一方法。然而，放电既是多物理场问题，又是多尺度问题。考虑到所需要的计算资源，分析如此大规模的仿真问题是极其困难的。”

### ⇒ 捕捉几何结构的误差

托木斯克的研究团队致力于寻找一种既准确又实用的计算方法。他们提出了一种基于计算工具的“分解”方法：不对整个电气设备运行完整的直流放电仿真，而是创建一个定制化的仿真 App，这个 App 可以自动分割并分析设备模型，找出最可能的临界区域。为了实现这一目标，他们采用了 COMSOL Multiphysics® 软件及内置的“App 开发器”工具来创建用于支持整个模拟过程的多物理场模型。

前处理是一个重要的建模步骤，其作用在于施加正确的边界条件和导入真实机载电气系统的详细几何结构。

研究团队在“App 开发器”中利用自定义的三维宏模型方法 (3D macromodel method) 执行了前处理。此外，他们还采用了自己导入的引擎模型，可自动修正对象边界。Kozhevnikov 解释说，三维宏模型方法包含了导入功能和自动修正对象边界的功能（图 3）。若没有自动修正功能，这些误差可能会导致无法运行仿真分析。

### ⇒ 解析等离子体物理问题

完成了前处理后，研究人员采用的建模方法包含以下三个阶段：对三维模型中的潜在临界区域进行初步静电分析；利用关联二维模型推算出场增强区域，并对临界区域进行定义；对临界区域进行直流放电模拟，进一步研究重要参数。

最初选择使用 COMSOL Multiphysics 是因为只有这款软件能够全面地描述二次直流放电理论模型的全部特征，而且还支持用户修改必要的参数。

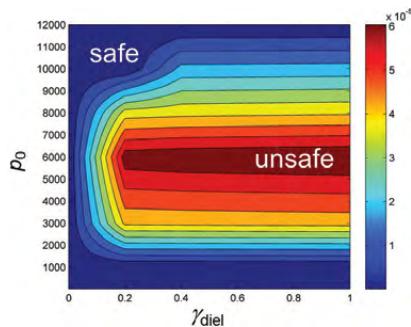
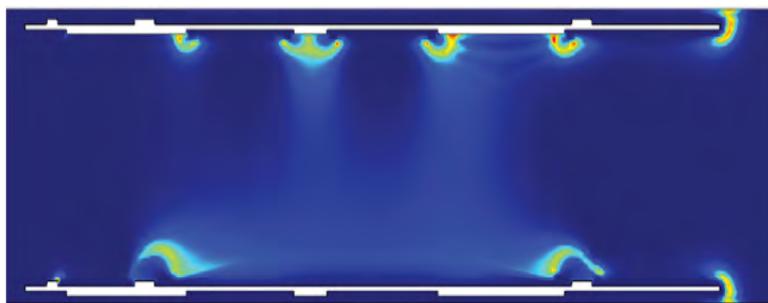


图 4. 左图：自持放电阶段的电子密度分布，这个二维模型来源于在卫星电源三维模型中定义的临界区域；右图：临界参数示例图显示了临界区域内压力与电子发射之间的关系，彩色图指示放电电流密度的水平。

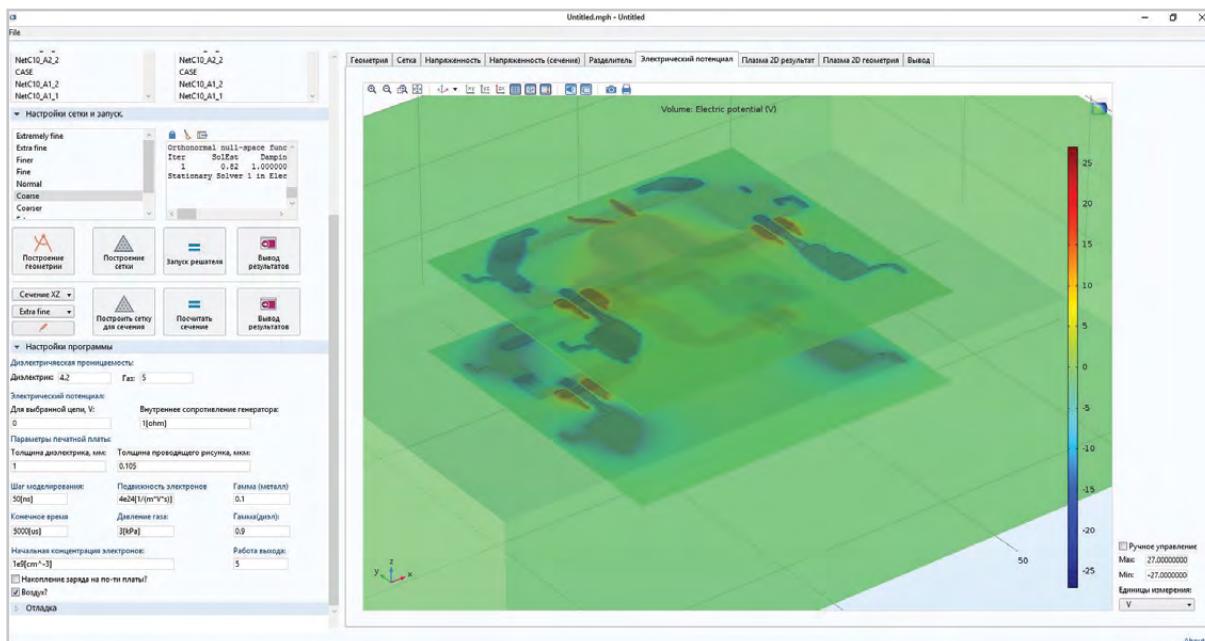


图 5. 借助 Kozhevnikov 开发的多物理场 App, 研究人员可以修改压力和电子发射等参数, 从而找到自持放电最可能发生区域。此 App 将电弧定位与特定放电阶段的研究相结合, 无需进行全尺度的直流放电仿真, 其中提供了一系列结果, 包括整个电路系统的电势。

研究人员通过仿真对电子密度的分布进行了分析, 并确定了临界区域的位置 (图 4)。Kozhevnikov 解释说: “COMSOL Multiphysics 从各方面满足了研究项目中对运行电压范围分析的需求。相比于粒子模拟 (particle-in-cell, 简称 PIC) 仿真, COMSOL 仿真在等电压和高压分析方面更加快速、简便。”

“PIC 仿真的计算成本过高, 显然并非解决此类问题的最佳方案。简化模型配置 (例如气体放电二极管) 的方法虽然可行, 然而达到中等压力后, 这种方法所耗费的时间可能是 COMSOL 仿真的 5~20 倍。对于此类结构, COMSOL 的平均计算时间少于两个小时。”

图 5 展示了研究团队创建的定制化仿真 App。仿真 App 中隐藏了构建模型时涉及到的复杂物理场, 因此用户在使用仿真 App 时只会接触到与自己分析工作相关的参数, 但是用户可以添加自定义命令和算法。

Kozhevnikov 表示: “具体来说, 在

COMSOL 的帮助下, 研究人员无需再自行编写计算代码, 便能够顺利地执行研究, 而这本来是一项非常复杂的工作。我们期待这款软件未来能在气体放电研究中发挥更大的作用。”此外, CAD 导入功能、“App 开发器”等丰富的前处理和后处理工具也是团队选择 COMSOL 软件的原因。

### ⇒ 仿真对轨道空间和跨学科研究的影响

仿真分析与物理实验相结合的方法, 为研究提供了更广阔的空间。Kozhevnikov 进一步解释说, “如果将来能够进行无损检测, COMSOL 仿真将通过排除非关键零件的方式来缩小实验的测试区域。在我们的项目合作框架下, 强电流电子学研究所真空电子实验室的同事们正在致力于无损检测的开发。”

“在航天器产业中, 自



Vasily Yu. Kozhevnikov 于 2008 年在俄罗斯托木斯克国立大学获得理论物理学博士学位。自 2008 年起, 他一直担任俄罗斯科学院西伯利亚分院强电流电子学研究所理论物理实验室 (托木斯克) 的助理研究员。从 2012 年到现在, 他使用 COMSOL 软件进行了大量的研究。

# 仿真为医疗器械行业带来变革

作者 **FREDDY HANSEN, ABBOTT LABORATORIES**

医疗器械行业的从业人员正努力冲破技术的束缚，希望能够帮助患者减轻痛苦、恢复健康并延长寿命。五年前，我离开了美国国家实验室，投身于医疗器械行业。当时我的研究工作只涉及计算流体动力学（CFD）仿真。然而，人体是一个极其复杂的系统，人们对它的控制方式又知之甚少，因此，模拟植入式医疗器械的难度也可想而知。

众所周知，定义数值模型的边界条件是一项十分艰巨的工作。举例来说，在研究植入式医疗器械时，即使是创建一个我们平时认为非常简单的热力学模型，其过程也会相当困难，这是因为我们并不清楚组织中血液灌注时的热量传递方式。仿真研究的另一个障碍是如何获取正确的材料属性。肌

“我从最近的案例中发现，在预测植入式医疗器械的性能方面，许多现有的实验测试方法不如仿真准确。针对此类问题，我们为何不使用仿真呢？”

肉、脂肪和其他人体组织可能具有一些奇特的性质。此外，随着时间的推移，医疗装置本身的材料也会因恶劣的环境而发生改变，金属材料会被腐蚀，非金属材料会吸收液体并让液体及其中的离子进行扩散。

既然有这么多困难，为什么还要选择使用仿真呢？这是因为计算机仿真的优势同样引人注目：建立和测试多个原型样机可节省大量时间和金钱，同时还能够随时随地“测量”任何自己感兴趣的参数。

对植入式医疗器械来说，医疗器械的检测是产品设计周期中费用最高的部分。在此类研究中，实际的测量固然可行，然而将流动探头、热电偶和其他传感器精准地放置到你所希望的位置却十分困难。针对此类研究，仿真能够帮助我们制定计划以及做好前期的准备。在仿真技术的帮助下，我们能够基于不同位置获得的实验数据，对缺失的数据进行必要补充，从而获取更加全面的分析。最终，我们能够减少必要的测试次数。在某些情况下，甚至只需进行仿真分析，而完全不必进行实验测试。

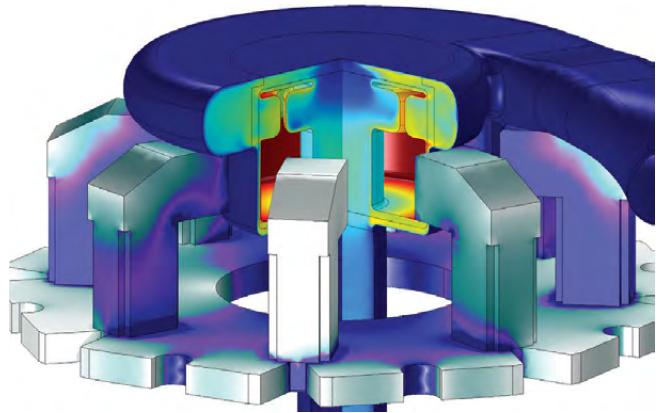
世界各地监管机构正在逐步采取措施，在监管审批过程中允许研究机构更多地利用仿真分析代替实验研究。这一趋

势令研究人员欢欣鼓舞。

除此之外，仿真在很多时候也可以取代成本较低的实验室测试。我从最近的案例中发现，在预测植入式医疗器械的性能方面，许多现有的实验测试方法远不如仿真准确。针对此类问题，我们为何不使用仿真呢？

仿真软件近年来不断发展和进步。在众多软件中我尤其喜欢 COMSOL，因为它拥有独一无二的多物理场功能。即使研究的问题不涉及多物理场的耦合，我也能使用相同的界面来模拟传热、电磁学、结构力学或流体动力学，大幅加快了工作流程，并减少了分析中的错误。不仅如此，我还可以输入任意的复杂材料属性，或者添加自己的常微分方程（ODE）和偏微分方程（PDE），并将它们无缝地耦合到软件内置的物理场中。

计算机仿真在医疗器械领域拥有广阔的应用前景。我非常高兴地看到，在过去的几年中，我的公司和整个医疗器械行业对仿真的需求和认可度越来越高。



在 COMSOL Multiphysics® 软件中模拟的左心室辅助装置 (LVAD)。



## 作者简介

Freddy Hansen 于加州理工学院 (Caltech) 获得应用物理学博士学位。他居住在美国旧金山湾区，目前供职于雅培公司 (Abbott Laboratories)，运用他在电磁学和流体动力学领域的专业知识设计人工心脏。Freddy 发表了 40 余篇研究论文、拥有 6 项正在申请或已授权的专利，并参与编写了一本畅销的大学物理教材。