


COMSOL NEWS

多物理场仿真杂志



通过多物理场仿真
获得最佳商业和工程解决方案

荷兰 TAUW 公司协助污水处理厂改善河流水质

P6

通过多物理场仿真获得最佳商业和工程解决方案

一个产品从起初概念的形成到最终的成品，其间充满了各种挑战。在此过程中，创新、环保、成本控制始终是产品经理和工程师追寻的目标。

本年度的《COMSOL News》讲述了仿真专业人士与同事、客户联手协作，共同寻找能够满足商业和工程目标的解决方案，例如在确保药品疗效和安全性的同时突破生产瓶颈。优秀的设计源于对物理系统的精确分析以及对其背后科学定律的准确表述。借助多物理场仿真软件，仿真专业人士能够在建模环境中包含所有相关的物理效应，并进行耦合分析，从而快速获取分析结果。他们通过创建准确的数字样机，减少对物理测试的依赖，探索和突破技术的极限。不仅如此，他们还通过开发仿真 App，将复杂的多物理场模型通过简单直观的界面呈现出来，方便全球的同事和客户对各种新想法进行虚拟测试。

通过阅读一个个实际案例，您将了解多物理场仿真如何帮助用户制定理想的商业和工程解决方案，其中包括通过多方协作，推进计算技术取得突破性进展、提高水质、开发非接触式磁力联轴器，以及减少多材料装配的腐蚀问题等。这本杂志将带你走进精彩的多物理场仿真世界！

祝您阅读愉快，享受建模的乐趣！



Valerio Marra
市场总监
COMSOL, Inc.



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

用户论坛 cn.comsol.com/forum

微信 COMSOL-China

微博 COMSOL 中国

您对《COMSOL News》的意见和建议，欢迎通过 cn.info@comsol.com 联系我们

COMSOL NEWS

© 2018 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。

目录

光刻系统

- 4 | ASML 使用多物理场仿真突破计算瓶颈

污水处理

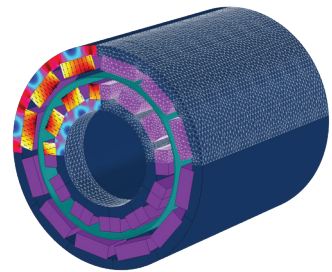
- 6 | 通过多相流仿真指导污水处理厂设计

生物制药工艺

- 9 | 多物理场建模在生物制药行业的应用

多材料装配腐蚀

- 12 | 铝合金在汽车轻量化中的应用：仿真 App 引领汽车设计



磁力联轴器

- 16 | 磁力传动技术延长海上风力发电场的使用寿命

科里奥利流量计

- 19 | 顺应潮流，优化流量传感器



封面图片

荷兰埃因霍温市以北 9.7 公里处，流经山恩伯伍格 (Son en Breugel) 村庄的多梅尔 (Dommel) 河沿岸风景。
图片来源：多梅尔河水务委员会 (Waterschap de Dommel)。

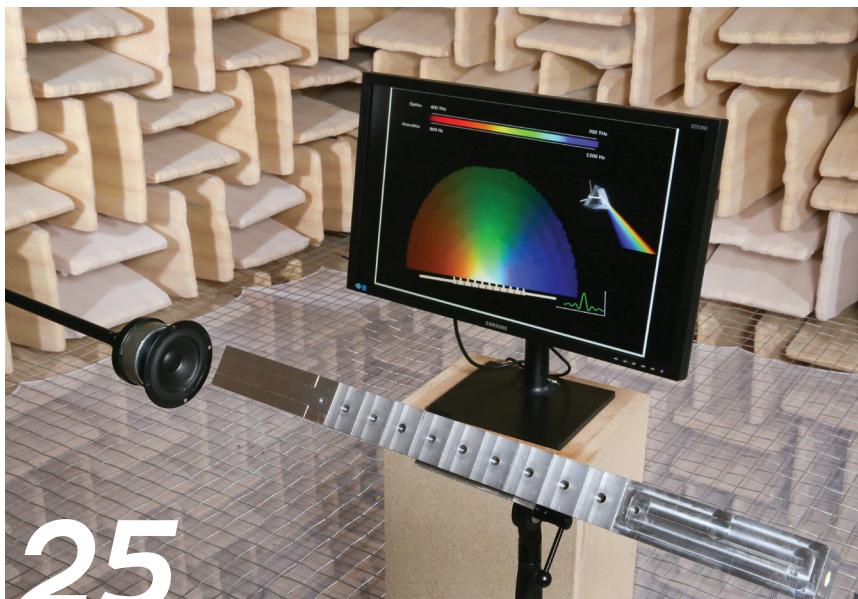
专题文章

22 | 热弹性流体动力润滑
仿真 App 加快摩擦润滑研究进程

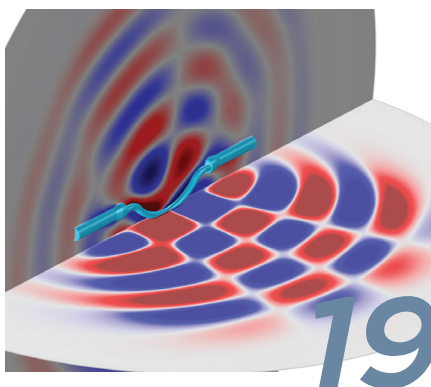
25 | 声学超表面
声学超表面仿真成就完美音质

28 | 钢铁生产
提高铁矿石烧结效率

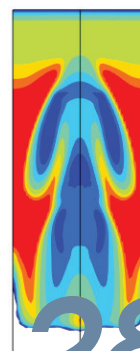
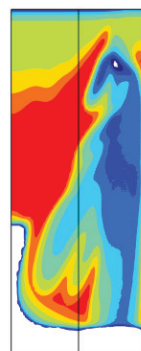
30 | 汽车产品设计
通过仿真 App 优化轿车设计



25



19



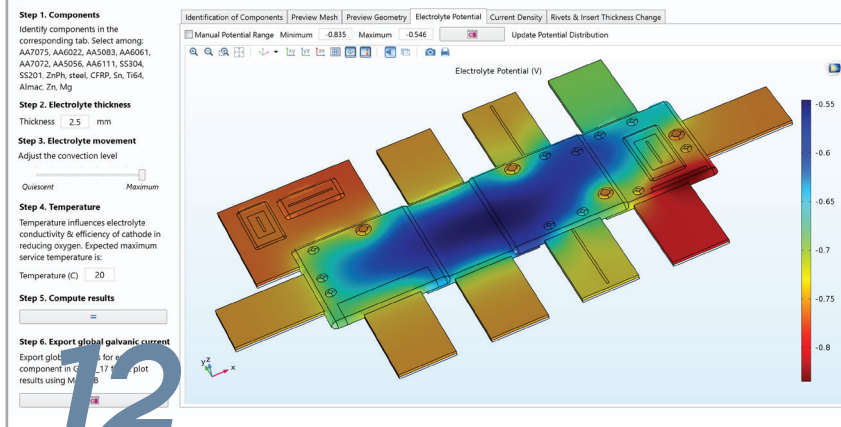
28

33 | 雷击防护
多物理场仿真为风力发电机免受雷击提供解决方案

36 | 电气系统
大型电气设备性能的仿真优化

39 | 特约评论
仿真 App 推动教育革新, 培养 STEM 人才

Galvanic Corrosion Behavior of a Complex Multi-Materials Assembly **NRC-CMRC** Corrosion Applications



12

ASML使用多物理场仿真突破计算瓶颈

ASML 公司的成功案例表明了多物理场仿真对于计算机芯片行业的重要性, 他们的宝贵经验可能适用于所有制造商。

作者 **VALERIO MARRA**

在性能强大的计算机上运行复杂的仿真分析, 以设计下一代生产计算机芯片的机器, 这听起来充满了未来科技感。然而在全球领先的光刻系统供应商荷兰阿斯麦(ASML)公司, 这已经是司空见惯的场景。ASML 生产的设备主要用于将芯片设计图曝光到硅晶圆上涂覆的光刻胶层上。

ASML 的客户包括众多顶级计算机芯片供应商。为了保持市场竞争优势, ASML 需要能够帮助客户跟上摩尔定律的步伐。他们深知若想让最新一代产品保持目前的发展势头, 就必须对各种紧密耦合的物理现象有更深刻的理解, 例如相互耦合的流体流动、固体力学等多种物理效应。

对于众多高精度(微米或纳米级)设备制造商而言, 多物理场仿真是不可或缺的工具。

⇒ 极紫外光带来的机遇与挑战

制造具备更高性能的芯片, 意味着要在单位面积内塞进更多晶体管。芯片的物理尺寸在不断变小(图1), 同时制造过程又对细微的环境变化十分敏感, 这给制造工艺提出了巨大的挑战。现有芯片加工工艺的精度与前几代系统相比, 已经有了大幅提升。最新款光刻机(图2)利用波长为 13.5 nm 的极紫外光(extreme ultraviolet, 简称 EUV)来进行光刻。“光的波长与芯片上的元件尺寸(临界尺寸)之间存在直接线性关系。”机械分析组组长 Fred Huizinga 解释道, “我们关注的是纳米尺度的形貌特征, 真正是失之毫厘, 谬以千里。”

光刻与刻蚀工艺需要在洁净的真空环境中进行, 并且需要采用精密的空气轴承, 而非润滑油或滚珠。空气轴承是承载表面之间的一个压缩气体薄层, 它对振动极其敏感, 即使是非常小的压力波动, 也会对蚀刻的精度造成巨大的影响。“对于这类系统来说, 物理测试可能会耗费大量时间。实际上, 有些现象微小到难以进行测试或测量, 因为有时变形程度甚至比仪器的测量精度还要小一个数

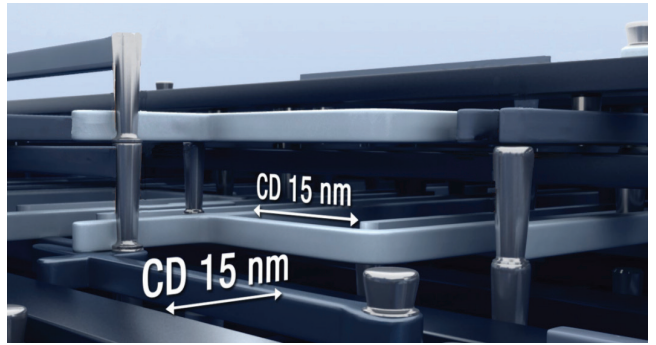


图1. 智能手机处理器的制程为纳米级。相比之下, 人类头发的直径比芯片制程大5300倍。

量级。”针对这种棘手的情况, 数值仿真成为了深入分析工程设计的唯一途径。

⇒ 功能完备的空气轴承设计工具

Huizinga 在加入 ASML 公司前, 从事过长达 25 年汽车行业的工程指导工作。他表示“如果只需要针对‘单个物理场’进行分析, 比如说单纯的热学或力学问题, 那么可以使用的工具有很多。但是, 我们的机器涉及许多物理现象, 因此需要使用很多仿真工具。”对于

Huizinga 而言, COMSOL® 软件是一件极有效的多物理场建模工具, 这是因为“纳米现象和复杂系统需要采用多物理场方法分析, 这就需要一套完整的多物理场仿真工具。”

ASML 开发的空气轴承模型示例(图3)充分体现了在研究中进行多物理场仿真的必要性。光刻机中时刻进行着大量的物理运动, 所以空气轴承对于 ASML 的重要性不言而喻, 由于空气轴承具有出色的刚度和隔热性能, 并且不会因摩擦而产生碎片颗粒。



图2. ASML® TWINSKAN® NXE:3350B 型 EUV 生产系统, 采用 13.5 nm 波长的极紫外光, 每小时可制造 125 个计算机晶圆。它在高载荷下快速移动晶圆时必须维持绝对真空状态, 并确保晶圆扭曲始终小于 1 nm。

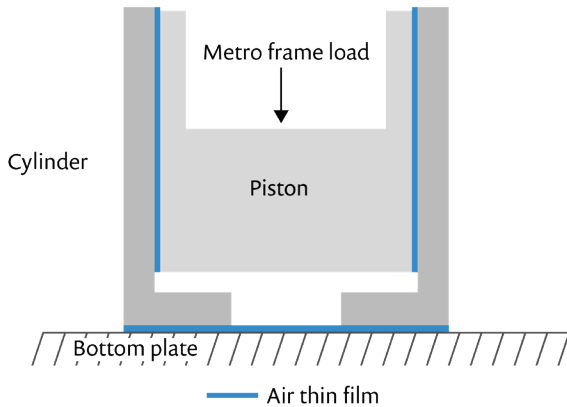


图 3. ASML 光刻系统的空气轴承示意图。图注：Metro frame load - Metro 框架载荷；Piston - 活塞；Cylinder - 气缸；Bottom plate - 底板；Air thin film - 空气薄膜

对仪器的高精度追求给 ASML 带来了新的挑战。气膜的压力分布会导致固体结构发生局部变形，影响轴承两侧表面之间的间隙宽度。而间隙宽度的变化会改变表面之间的空气流动，反过来又会影响压力分布，继而影响固体表面的变形程度(图 4)。这种现象需要使用一个流体-固体的全耦合模型进行分析。ASML 使用 COMSOL 软件创建了一个仿真模型，工程师可以自由指定所需的重要设计标准，其中包括平动和旋转刚度、负载下的间隙尺寸以及空气消耗量。

Huizinga 提及的另一个未来应用场景是模拟加工台上的晶圆所承受的载荷。晶圆上的形变非常小，为纳米量级。通常利用真空装置或静电场产生夹紧力使晶圆能够固定在加工台上，因此在

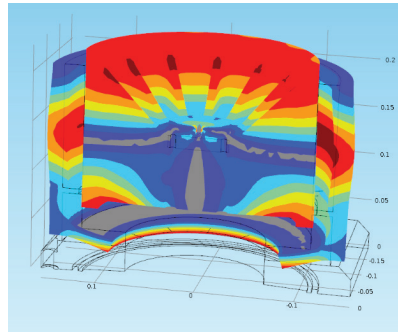


图 4. 仿真结果显示了空气轴承中气缸和活塞的径向变形。

研究时必须将晶圆视为受重力、摩擦力、热效应和附着力影响的弹性体，这又是一个全耦合的多物理场问题。设计人员可以利用模型优化设计，无需经历既耗时又昂贵的样机制作流程。

⇒ 通过仿真 App 实现复杂设计

易用性对于一款仿真工具而言，与建模功能同等重要。即使是能够熟练操作多物理场仿真软件的工程师，简单易用的仿真 App 也同样会为他们提供巨大的便利，让他们能够免去大量常规或复杂的工作。ASML 的工程师使用 COMSOL Multiphysics® 软件的“App 开发器”开发了一个名为“空气轴承计算器”的仿真 App。团队成员借助这款易用性极佳的开发工具，无需修改原始模型，就可以对各式轴承设计的性能进行虚拟测试(图 5)。“仿真 App 帮助我们大幅减少了创建网格、设置分析和后处理的繁琐工作。”Huizinga 表示。

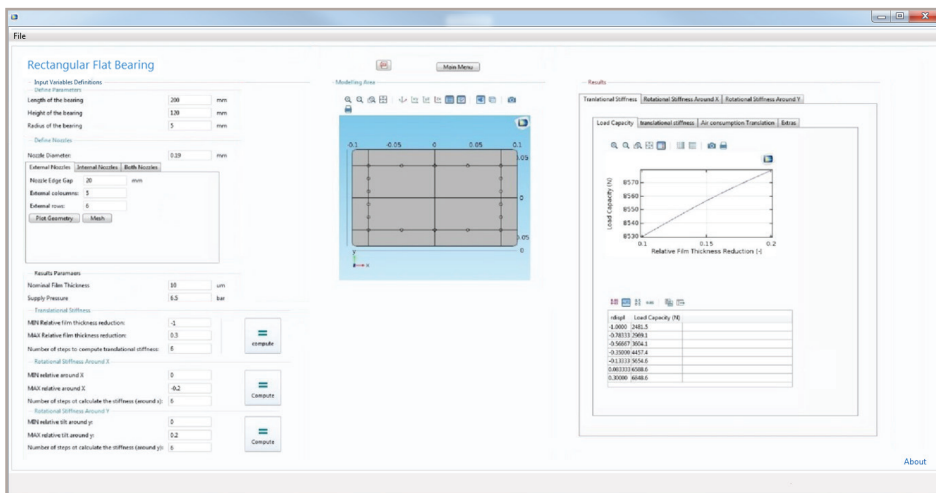


图 5. ASML 公司创建的空气轴承分析计算器可以让工程师通过输入尺寸参数和其他变量来获取结果，而无需进行指定网格、模型设置及其他后处理操作。

“COMSOL® 软件是一件极有效的多物理场建模工具，这是因为纳米现象和复杂系统需要采用多物理场方法进行分析，这就需要一套完整的多物理场仿真工具。”

— FRED HUIZINGA, ASML 公司机械分析组组长

通过多相流仿真 指导污水处理厂设计

荷兰 TAUW 公司的工程师和多梅尔河水务委员会借助计算流体动力学仿真, 在提升多梅尔河水质的同时, 最大限度地降低了埃因霍温污水处理厂的建造成本。

作者 SARAH FIELDS

多梅尔河 (Dommel) 发源于比利时南部边境, 途经荷兰埃因霍温市 (Eindhoven), 一路向北汇入宽阔的马斯河。流域中的污水处理厂以及十多个城市的 200 多道合流式污水溢流 (combined sewer overflows, 简称 CSO) 都会向多梅尔河排放污水, 日均污水排放量接近 17 万立方米。

多梅尔河水务委员会负责监测河流的水质状况, 并致力于实现人类生活、环境保护和经济发展之间的最佳平衡。水务委员会为达成这一目标启动了 KALLISTO 项目, 这个综合研究项目旨在通过制定一套最具经济效益的措施, 尽可能地减少由污水处理厂生物水处理的合流式污水溢流共同造成的河水氧含量下降和氨含量上升等问题。通过实现上述目标, 水务委员会不仅能有效实施《欧盟水框架指令》(Water -

Framework Directive), 更有利于维持多梅尔河生态系统的稳定。

多梅尔河水务委员会的水处理技术高级顾问 Tony Flameling 表示: “我们一直严格控制着多梅尔河水中的磷酸盐、氮和悬浮物含量。为改善河流的水质状况, 拥有更健康的河流, 此类物质含量的标准将会更加严格。”为了实现目标, 水务委员会引进了一套曝气系统 (将空气中的氧强制加入水中), 希望在将生物处理废水排入河流前, 提高水中的氧气含量。“引进曝气系统的目的是为了

避免多梅尔河的生态系统因水中氧含量过低而遭到破坏。”Flameling 解释道。

在进行曝气处理之前, 需要先对污水进行预沉淀、污泥活化和澄清处理, 以去除营养物质和固体物质。为了尽量降低处理过程中的能耗, 需要使水位维持在一



图 1. 埃因霍温污水处理厂鸟瞰图。

定的高度, 以确保水能够流经整个处理厂 (图 1)。

为了研究引入曝气系统对水体的影响, Flameling 与荷兰 TAUW 公司的水处理技术和水资源管理顾问 Ronnie Berg 进行了深入的交流。

Berg 解释道: “如果污水管道中的水位过低, 氧气将无法有效传递; 但如果水位过高, 脏水又可能会从曝气池中溢出, 流入

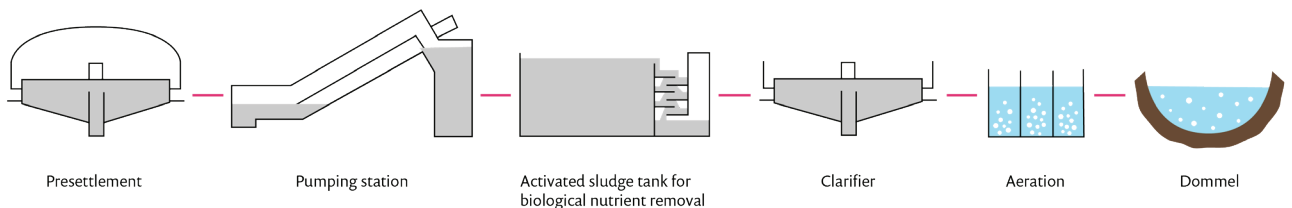


图 2. 埃因霍温污水处理厂的水处理流程图。在将处理后的污水重新注入多梅尔河之前, 对污水进行曝气处理。图注: Presettlement - 预沉淀; Pumping station - 污水泵站; Activated sledge tank for biological nutrient removal - 用于去除营养物质的活性污泥池; Clarifier - 澄清池; Aeration - 曝气; Dommel - 多梅尔河



图 3. 曝气通道出口处的可调出水堰。

沉淀池, 污染出水。”(图 2)。

另一个潜在问题是, 水位过低会导致污水处理流程无法正常进行。通过分析污水通道及与之相连的外流通道中的流体形态, 水务委员会可以确定系统的最佳设计方案, 最大限度地提升曝气效果。

⇒ 气泡: 鱼类的朋友, 水流的敌人?

为了充分认识曝气系统和出水堰(图 3)对水流和水位的影响, Berg 使用 COMSOL Multiphysics® 软件建立了多相流仿真。

引入曝气池后, 需要对现有通道进行改造, 为此, Berg 为出水通道创建了一个几何模型(图 4), 其中包含通道壁、已有的导流板以及曝气元件的计划安装位置。

Berg 详细设定了曝气单元的布局、可调出水堰不同闸门的高度以及多梅尔河的水位。通过对系统进行分析, Berg 能够判断导流板的位置是否合理, 以及流体形态如何随曝气、季节和多梅尔河的水位而变化。

Berg 建立了一个含有强湍流和分散气泡的流体流动模型。借助软件中内置的“气泡流, $k-\epsilon$ ”接口, Berg 能够捕捉曝气过程对流体形态的影响。此外, 通过模拟气泡引起的湍流以及追踪有效气体密度, 他还分析了气泡产生的附加阻力和通道内的螺

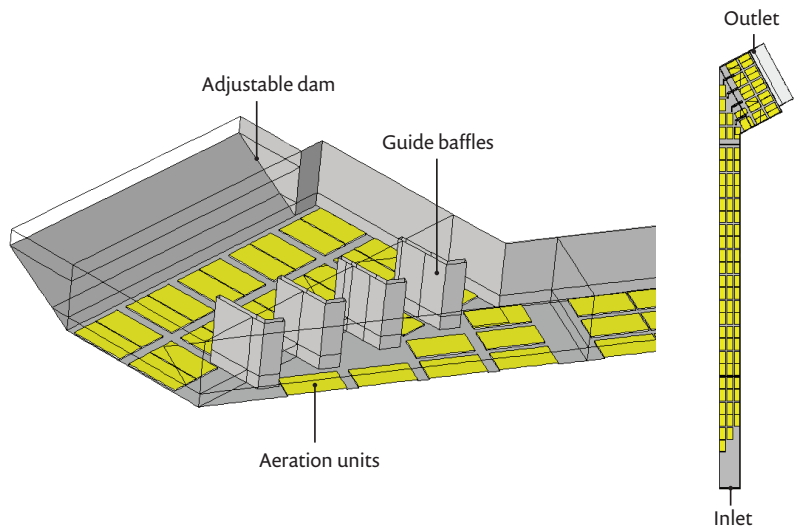


图 4. 曝气通道的几何布局。曝气单元以黄色表示。图注: Adjustable dam - 可调出水堰; Guide baffles - 导流板; Aeration units - 曝气单元; Inlet - 入口; Outlet - 出口

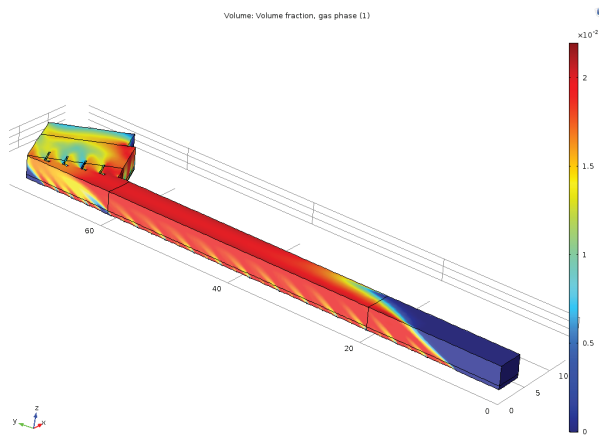


图 5. CFD 仿真分析结果显示了多梅尔河处于高水位时的气相体积分数(即气体在水中的体积占比)。

旋流。

Berg 利用一组 CFD 仿真结果研究了多梅尔河的水位对流体形态的影响。他能清楚地了解通道内任意位置的气体体积占比, 用于判断曝气系统的有效性(图 5)。

除此之外, Berg 还评估了曝气单元在旱季多梅尔河的水位较低时的表现。当河水流量较小时, 在调节出水堰的所有坝段高度后, 河水在坝下会产生部分回流(图 6)。

Berg 通过分析水位、出水堰高度和曝气变量对流体形态的影响得出了多项

结论。他了解到, 如果出水流量较大, 曝气对水体基本没有影响。而在干旱时节, 河水流量减少, 曝气则会影响流体形态。然而, 由于曝气产生的阻力相对较小, 所以水流因阻力流回澄清池并污染出水的风险

“仿真软件让我们能够以一种可控的方式来调整参数, 帮助我们灵活地找到了最佳施工设计方案。”

—— RONNIE BERG, TAUW 公司顾问

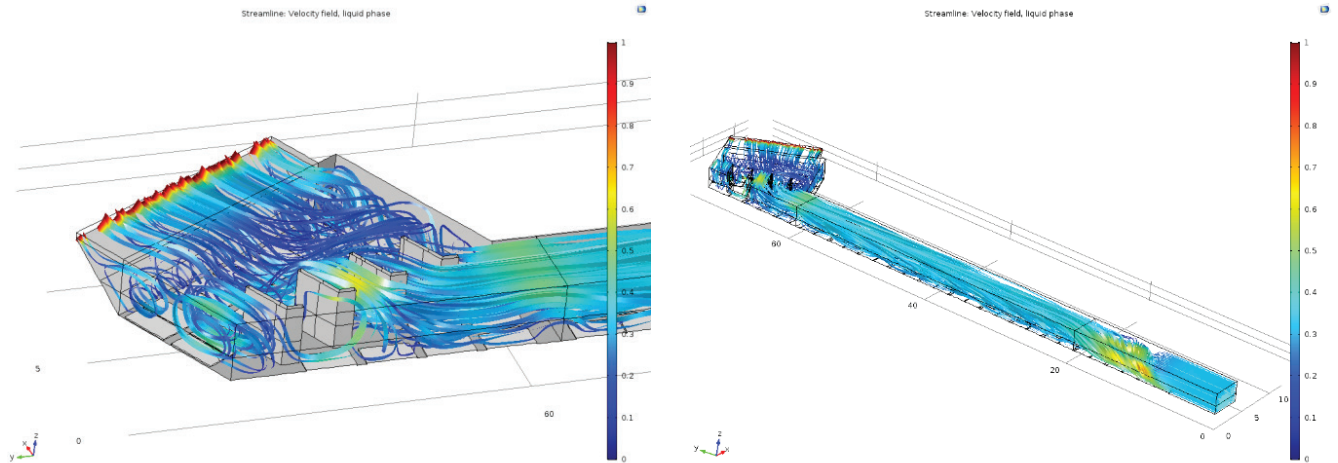


图 6. CFD 仿真结果显示了在气候干燥河水流量较小时, 处理后的污水在曝气系统中的速度场。



图 7. 工作状态下的埃因霍温污水处理厂的曝气通道, 它有效增加了注入多梅尔河水中的含氧量。左: 曝气通道出口处的可调出水堰。右: 从曝气通道的入口观察曝气通道。

比较低。

Berg 还研究了只打开两个出水闸门时的情况。此时, 外侧弯道的水流量明显更高, 这将导致内弯附近形成积水, 从而降低曝气过程的效率。总体而言, 在三个闸门全部打开通水时, 才能得到最佳的水流形态。

⇒ 仿真指引设计之路

Berg 根据详细的 CFD 分析结果, 向多梅尔河水务委员会提议不要拆除导流板。他还建议将上游的曝气组件按照线性布局进行排列, 因为这种布局不仅有利于

改善水质, 还能将施工成本降到最低。

“仿真软件让我们能够以一种可控的方式来调整参数, 帮助我们灵活地找到了最佳施工设计方案。”Berg 表示, “我们成功地以低成本、高收益的方式提高了埃因霍温污水处理厂出水的水质。”图 7 为运行中的曝气系统。Flameling 补充说: “为了保护河流的生态系统, 我们目前正在观察曝气系统是否能达到预期效果。”在未来的许多年里, 这个性能优异的曝气装置将为多梅尔河的生态系统和周边居民提供长期可靠的保障。❖



Ronnie Berg,
TAUW 公司。



Tony Flameling,
埃因霍温水务
委员会。

多物理场建模 在生物制药行业的应用

在美国安进 (Amgen) 公司, 各类多物理场仿真 App 在优化工艺、改进工作流程, 以及确保药品安全和疗效等多个方面发挥了重要作用。

作者 **ZACK CONRAD**

由于药物的研发模式、功能和商业化阶段复杂多样, 所以应用于生物制药行业的各类建模和仿真工具需要同时具备广泛的适用性和足够的专业深度。

安进 (Amgen) 公司是市场领先的跨国生物制药企业。为了确保药物的有效性和安全性, 公司的研发人员将多物理场仿真这一工具应用到了药品加工的整个流程中。安进公司生产的各类药物惠及全世界数百万身患重疾的病人。一款药品成功面世的背后离不开大量的研发及生产流程。安进公司正在通过构建多样化的工艺模型组合来优化工作流程。在一个对工艺模型而非产品模型更为重视的行业中, 这样的工艺优化也成为了企业制胜的法宝。安进公司的工艺开发总监 Pablo Rolandi 负责使用 COMSOL Multiphysics® 软件为公司的研究人员建立一个平台化的建模环境。Rolandi 解释道: “COMSOL 软件是一个具有现代设计理念的成熟平台。简明、流畅、易用的接口和图形用户界面, 以及强大的单物理场和多物理场仿真功能, 让我们能够创建出丰富多样的工具。” 为应对各个研发阶段出现的各类问题, Rolandi 和团队成员将目光投向多物理场建模, 希望在这里找到解决方案。在很多项目中, 仿真解决方案也会伴随着仿真 App 的开发。研发团队利用软件中的“App 开

发器”, 直接将模型转换成仿真 App, 通过定制化的用户界面让最终用户无需掌握专业的建模知识, 就能够运行仿真, 并利用仿真结果指导后续工作。在过去的一年半中, 他们开发了许多简单易用、交互性强且易于部署的仿真 App, 让企业在工艺开发、生产作业和研发等各个环节中受益于仿真带来的优势。

⇒ 消除生产中的瓶颈

Rolandi 的团队通过开发定制化的仿真 App, 解决了生产工艺中的诸多问题, 对干燥工艺进行优化是其中最具代表性的案例之一。该项目是为了将小分子药物的生产线从合同生产外包企业 (contract manufacturing organization, 简称 CMO) 搬迁到安进公司在新加坡开设的工厂。生产线采用了如图 1 中所示的干燥工艺。其中,

使用搅拌过滤干燥器 (agitated filter dryer) 执行隔离干燥的工序, 被认为是生产过程中的潜在瓶颈, 这一问题可能为满足产品的市场需求带来巨大风险。于是 Rolandi 及其团队开始着手模拟干燥工序并试图简化工艺流程。然而 CMO 在干燥工艺的前三个步骤 (图 1) 中使用了不同类型的干燥器, 而他们当时缺少可以表征分离设备特性的数据, 因此无法对工艺进行准确建模, 也就无从判断工作条件的改变对生产过程的影响。

干燥系统的已知属性包括: 材料属性、设备的几何参数, 以及湿度、温度、压力、是否包含搅拌等一系列工作条件。此外, Rolandi 还需要确定两个关键因素: 新投入使用的搅拌过滤干燥器的蒸发率和扩散系数。他们为此进行了广泛的数据采集, 并使用多物理场仿真, 估算了用于表征模型特

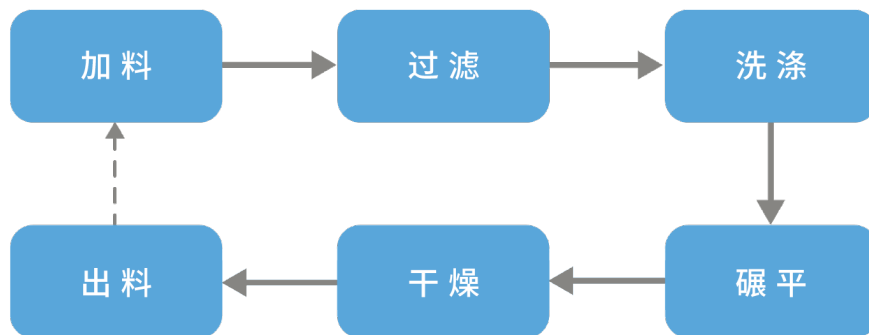


图 1. 典型的分批过滤和干燥工艺的基本步骤, 该工艺的目的是对化学物质进行隔离或物理分离。

性的回归参数。在完成上述分析后,他们创建了可计算干燥时间的仿真 App,并将其提供给工艺工程师,用于确定一些关键生产阶段中的工作条件。终端用户可以在如图 2 所示的仿真 App 中直观地查看工作条件变化所产生的影响。借助仿真 App,他们发现,在搅拌器中添加一个加热板,可以减少干燥时间,从而减弱了瓶颈的限制,提高了整体生产效率。

⇒ 符合灭菌质量标准

安进公司的一支生产团队遇到了有关灭菌方面的问题。制造商供应的化合物装在原料容器中进行运输。这些容器通常是小药瓶。由于药品中的细菌可能造成极大的健康危害,所以需要对所有容器进行灭菌消毒,达到规定的卫生标准后才能重新使用。在标准的灭菌方案中,使用环氧乙烷的扩散作为主要的物质传输机理,这种方法并不能满足新型容器的灭菌要求。

毫无疑问,灭菌的过程需要进行调整。Rolandi 并未依赖不必要的实验和昂贵的迭代试错,而是带领团队首先使用仿真软件模拟了环氧乙烷在药瓶中的扩散情况。

团队基于仿真模型开发的仿真 App 可以用于选择渗透边界和污染边界,输入溶解度和扩散常数,以及生成随时间变化的环氧乙烷浓度分布图(图 3)。工艺工程师可以利用仿真 App 来判断环氧乙烷的浓度是否足以保证充分杀菌。令人欣喜的是,仿真 App 的使用有效地减少了实验次数,甚至无需进行实验,项目的整体进度由此加快了数月。“结果表明,创建仿真 App 让研发效率得到了大幅提升。”Rolandi 评论道。

⇒ 仿真的扩展

Rolandi 表示:“我非常热衷于思考如何将仿真应用于先进技术的开发与集成。

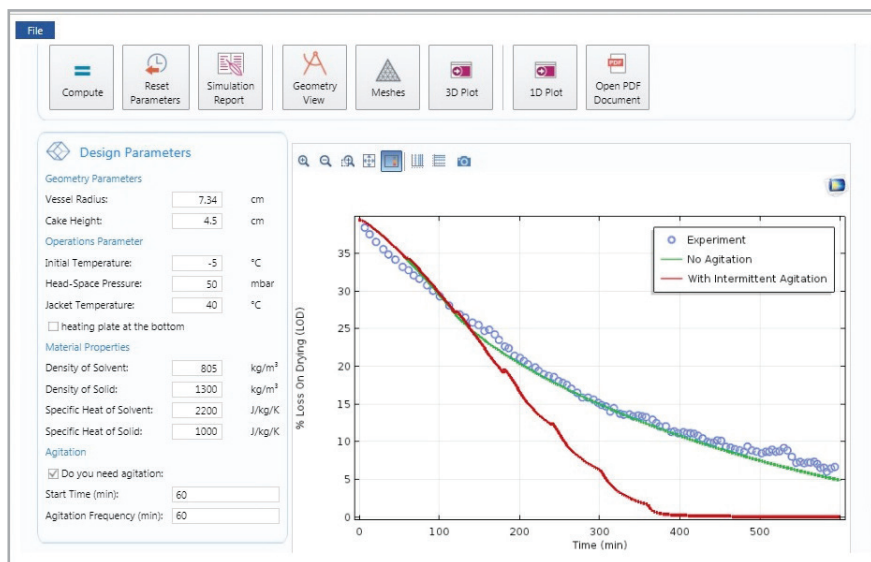


图 2. 仿真 App 分别计算了无搅拌(绿色)和间歇搅拌(红色)所需的干燥时间,并将计算结果与实验数据进行了比较。

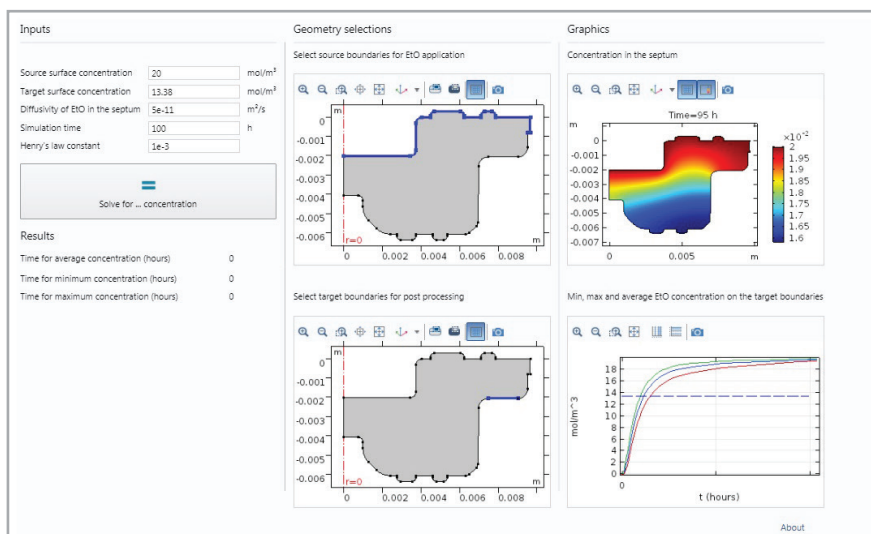


图 3. 灭菌过程仿真 App, 可用于计算环氧乙烷的浓度。

在我看来这是一个具有战略性的挑战,目前这项工作才刚刚起步。”他的目标之一是在模型中加入不确定因素。在真实世界中,参数多为不确定的值,工作条件也复杂多变。将这些可变因素集成到仿真中,可以得到更加贴合实际应用场景的预测结果。

举例来说, Rolandi 与团队成员正在研发一款自动注射器,这种装置可以自动将药物注射到患者体内,无需医师进行操作。给药时长是注射器的一个关键参数,需

要非常精准地进行控制,才能确保药物达到预期疗效。问题在于,给药时间取决于多种因素,而所有因素均有不同程度的不确定性,这些因素包括容器的几何形状、药物的粘度和体积、注射器的弹簧常数,以及柱塞的摩擦常数。如果不对上述因素的不确定性加以考虑,便不能准确模拟给药时间,也就无法精确控制注射器以达到预期效果。在工艺建模中,创建预期结果的概率分布是一项有效的分析手段,有助于更全面

地了解系统的性能表现。

为了更好地掌握参数的不确定性对系统整体性能的影响, Rolandi 及其团队使用多物理场仿真对系统执行了全局灵敏度分析, 并严格量化了各因素变化带来的影响。团队通过分析得到了每个参数的灵敏度指数, 即各参数对结果产生影响的权重。他们发现药品粘度、弹簧常数和针头几何形状对注射时间产生影响的权重总和约为 90%。他们据此大幅简化了模型, 因为既然只有少量参数会对注射时间产生显著影响, 那么只要合理地加强对关键组件供应商的规范管理, 就能更加简单有效地掌控不确定性和风险。

研究人员也同样将注射时间模型封装成了一个易于使用和部署的仿真 App。这个仿真 App 可以让用户定义输入分布, 运行不确定性和灵敏度分析, 自动编写报告以及显示模型文档 (图 4)。仿真 App 不仅有助于节省时间和成本, 还让研究人员可以更加有效地管理整个过程中的不确定性。

⇒ 部署仿真 App

安进公司在公司内部安装了 COMSOL Server™ 产品, 让更多员工可以自由地通过网络环境使用仿真 App。“我们非常希望把手中的一系列仿真 App 分发给公司的每一位员工。”Rolandi 表示,“在 COMSOL 软件的帮助下, 目前约有十几个仿真 App 正在公司的各个部门发挥着重要的作用, 这让我感到非常自豪。”COMSOL Server 不仅让仿真 App 的部署变得非常简单, 同时改进了产品的生命周期管理。用户只需

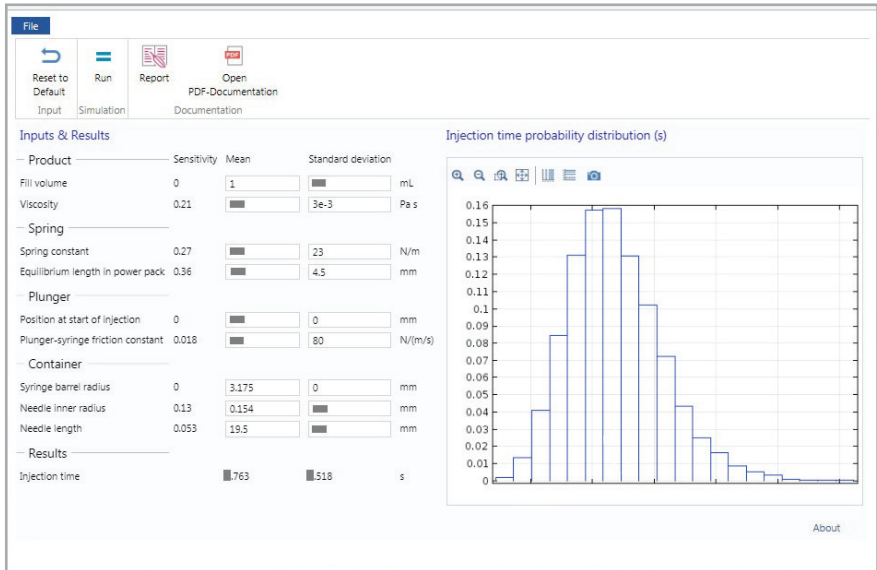


图 4. 自动注射器模型仿真 App 显示了注射时间的概率分布。涉及知识产权的数据已被隐藏。

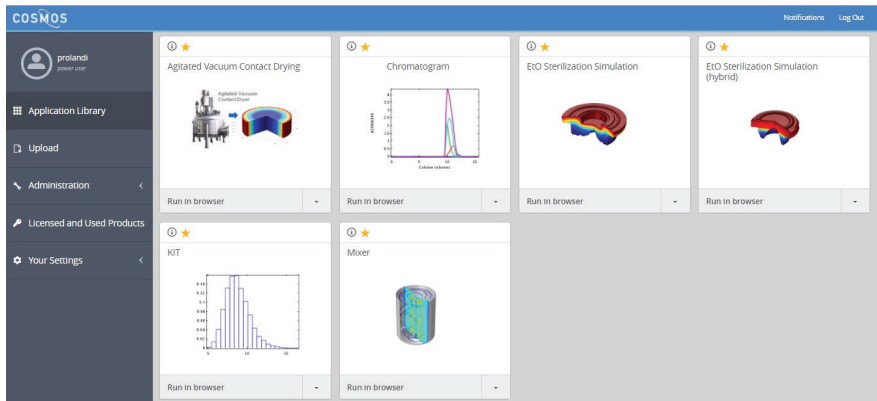


图 5. 安进公司为自己的 COMSOL Server 库设计了专属商标, 他们将系统命名为 COSMOS。

通过网页浏览器登录, 即可访问 Rolandi 团队开发的仿真 App 库。为了使系统更加成熟易用, 他们计划移除手动输入部分, 将 COMSOL 模型作为“计算内核”使用。这可以通过使用大量基于模型研究得到的先进算法, 实现对模型的重复利用。这一方式标志着仿真分析向企业级建模迈出的关键一

步, 并将为庞大的用户群和合作伙伴带来实际的商业价值。❖



Paulo Rolandi, 安进公司工艺开发总监

“在 COMSOL 软件的帮助下, 目前约有十几个仿真 App 正在公司的各个部门发挥着重要的作用, 这让我感到非常自豪。”

—— PABLO ROLANDI, 安进公司工艺开发总监

铝合金在汽车轻量化中的应用： 仿真 App 引领汽车设计

加拿大国家研究院 (NRC) 的科研人员借助多物理场仿真 App, 最大程度地降低了新设计方案中的电偶腐蚀风险, 推进铝合金材料在汽车轻量化中的应用。

作者 **SARAH FIELDS**

近年来, 随着汽车制造商和消费者环保意识的提升, 汽车正向着轻量化的方向发展。当车身重量减少 10%, 汽车的燃油效率可以提高约 8%。为了实现轻量化设计目标, 制造商需要将传统的车体结构材料和车身材料(例如结构钢)与更轻质的材料结合在一起。铝(图 1)的密度只有钢的三分之一, 具有耐候性强、回收利用率高、易于加工成型、防撞性强等优点, 因此成为了极具潜力的汽车轻量化材料。

然而, 开发混合使用钢与铝合金材料的汽车困难重重, 其中包括: 如何开发低成本量产技术; 如何在部分零件中用铝质材料替代原有材料, 实现多材料装配; 如何降低因电解质(如洒在道路上的除冰盐)导致的相互接触的异种金属间产生电偶腐蚀的风险(图 2)。

Danick Gallant 是加拿大国家研究院(NRC) 汽车和地面运输研究中心(Automotive and Surface Transportation -



图 1. 高压压铸 (high-pressure die casting) 的铝合金。

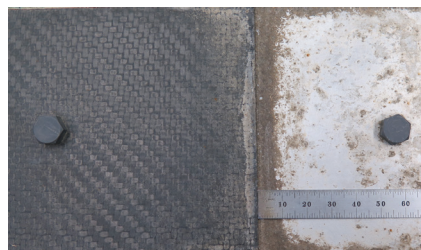


图 2. 上: 经过一年在役暴露实验后, 由碳纤维增强聚合物 (carbon-fiber-reinforced polymer, 简称 CFRP) 和 6000 系列铝合金制成的多材料叠加式装配制成的车身上的电偶腐蚀情况。下: 用于车辆运行测试的汽车样件常见安装方式。



从左至右: 来自加拿大国家研究院下属的铝合金技术研发中心的 Richard Menini, Mario Patry, Sandy Laplante, Amélie Ruest, Marc-Olivier Gagné, Axel Gambou-Bosca, Philippe Tremblay, Stéphan Simard, Danick Gallant 和 Alban Morel。

Research Center) 的技术主管, 负责腐蚀控制技术以及耐腐蚀部件和装配的研发工作。在工业领域的应用中, 单焊缝连接会涉及多种腐蚀问题, 例如缝隙腐蚀和电偶腐蚀

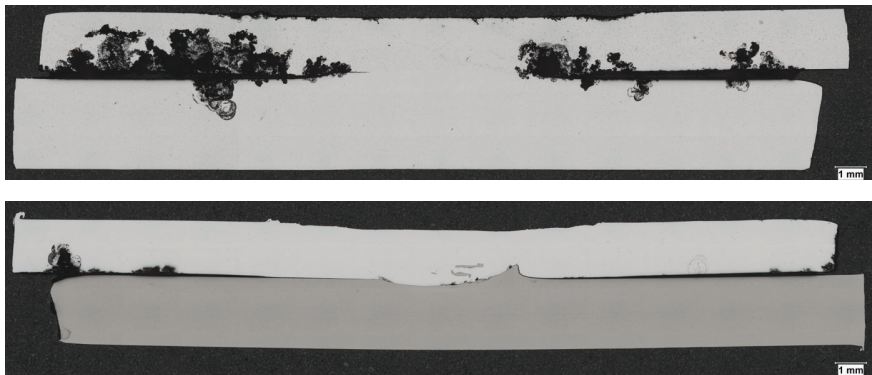


图3. 车辆经过 10 万公里公路行驶后, 车轮和挡泥板之间经搅拌摩擦焊接 (friction-stir welded, 简称 FSW) 而成的多材料装配剖视图。上: 在 AA7000 系列与 AA6000 系列的 FSW 装配中, 缝隙腐蚀为主要的腐蚀方式。下: 在 AA5000 系列与不锈钢 300 系列的 FSW 装配中, 电偶腐蚀为主要的腐蚀方式。

(图 3), 这就给汽车行业带来了巨大的挑战。NRC 及其合作伙伴 ALTEC 多客户铝技术研发合作集团(图 4), 共同致力于推动铝合金在轻量化设计中的应用, 并为运输行业提供针对上述问题的技术支持和解决方案。

虽然 ALTEC 成员公司拥有各自不同的核心业务, 但每个公司都高度重视腐蚀控制的相关项目。装配腐蚀问题的预测能力对于铝板产品制造商而言是至关重要的, 只有充分了解腐蚀情况, 才能确保产品以正确的方式进行使用, 保证可靠性等指标达到预期要求。这对于汽车制造商而言也同样重要, 它关乎着汽车能否性能出色, 经受住时间的考验。

⇒ 消除电偶腐蚀

汽车设计工程师可以利用一些通用方法来延缓电偶腐蚀的发生, 其中包括: (1) 避免出现大阴极小阳极; (2) 遵守电偶腐蚀兼容性图表; (3) 避免异种金属之间的任何直接接触; (4) 对两种不同的接触材料进行喷涂, 或只喷涂阴极。然而上述方法对于实际应用却并没有太大的意义, 因为在真实条件下应用这些方法几乎是不可能

的。举例来说, 如果安装了机械紧固件, 那么金属与金属之间必定存在接触, 而机械紧固件在异种材料装配中有着极其广泛的应用。



图 4. ALTEC 多客户铝技术研发合作集团的成员公司(左)和合作伙伴(右) (截止日期 2018 年 3 月 19 日)。

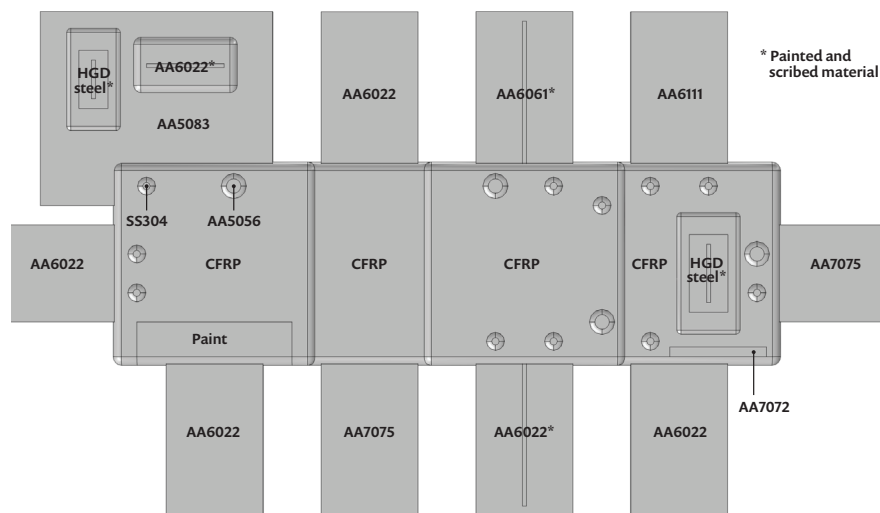


图 5. 多材料装配展示了利用腐蚀仿真发现不合理设计的重要性。图注: Painted and scribed material - 涂刻材料

物理测试可以揭示复杂系统的行为特性, 因此仍然是必不可少的环节, 它包括路面测试、循环腐蚀和电化学测试。检查车载部件的测试既耗时又昂贵, 而标准的循环腐蚀测试常常容易高估电偶腐蚀的风险。此外, 如果材料还具有复杂的几何结构, 电化学测试便更加难以提供准确的结果。

研究人员发现, 将物理测试和多物理场仿真分析结合使用, 可以在制造物理样机之前解决设计难题, 加速耐腐蚀设计的开发进程。

⇒ 多材料装配的腐蚀建模

根据由 COMSOL Multiphysics® 软件得到的在役、循环腐蚀和电化学测试信息, Gallant 及其团队创建了灵活、易用的

数学模型,可对腐蚀行为进行预测。Gallant 解释说:“为了创建能反映真实动态过程的虚拟样机,我们利用一组安装在汽车上的传感器对模型进行了校准。”团队借助模型获取了高质量的数据,并采用先进的数据分析程序和机器学习模型从数据中提取了所需的信息和知识。模型中包含车底的表面温度、润湿时间、成分、汽车表面沉积的除冰盐的电导率、车辆速度和 GPS 定位在内的每一组数据。

在项目启动初期, Gallant 考虑过好几款不同的腐蚀仿真软件。他在尝试过程中发现,许多常见的软件虽然允许用户控制输入,但是隐藏了内部的计算过程,就像是

不支持修改的“黑匣子”,而 COMSOL® 软件则支持用户指定和控制模型的所有属性。“COMSOL 软件具有强大的腐蚀建模功能,同时支持从其他软件中导入几何模型,这给予了我们有力的支持。通过对不同的电偶组合进行测试,我们可以在制作物理样机之前,充分了解需要调整的几何参数。”Gallant 解释说。

Gallant 与团队成员构建了由 10 多种材料和涂层构成的复杂装配(图 5),并将其作为面向 NRC 潜在客户的研究案例和实验室演示材料。由为期四天的实验室腐蚀试验得到的腐蚀破坏测试结果与仿真结果高度吻合,充分说明了使用 COMSOL

“COMSOL 软件具有强大的腐蚀建模功能,同时支持从其他软件中导入几何模型,这给予了我们有力的支持。通过对不同的电偶组合进行测试,我们可以在制作物理样机之前,充分了解需要调整的几何参数。”

——DANICK GALLANT, 汽车和地面运输研究中心技术主管

Multiphysics 软件建立的 NRC 腐蚀模型可以准确预测复杂多材料装配的腐蚀情况。

团队通过 COMSOL Multiphysics 软件研究了实验室腐蚀暴露试验中牺牲阳极的厚度损失随时间的变化(图 6)。实验结果和仿真结果高度吻合。从实验数据和仿真结果均可看出,因左侧为尺寸较大且更为活跃的铝部件,铝铆钉左侧的溶解过程受到了抑制(图 7)。右侧为惰性碳纤维增强复合材料,致使铆钉右侧受到了腐蚀。团队据此再次证实了仿真准确反映实验结果的能力。

⇒ 仿真 App 助力前沿设计

在创建数值模型后, Gallant 又使用 COMSOL Multiphysics 软件中的“App 开发者”工具开发了一个可与同事们共享的仿真 App。利用公司内安装的 COMSOL Server™ 产品(图 8),他可以通过网页浏览器快速部署仿真 App、管理用户、应用定制品牌,并根据需要分享更新。同事和客户可随时随地通过网页浏览器登录,访问这些仿真 App。

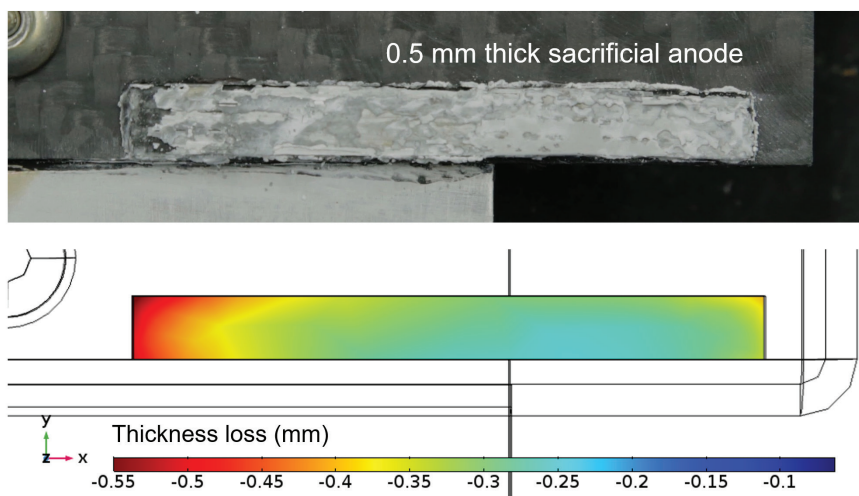


图 6. 利用瞬态分析(下)计算牺牲部件在实验室腐蚀暴露试验(上)期间的厚度损失。

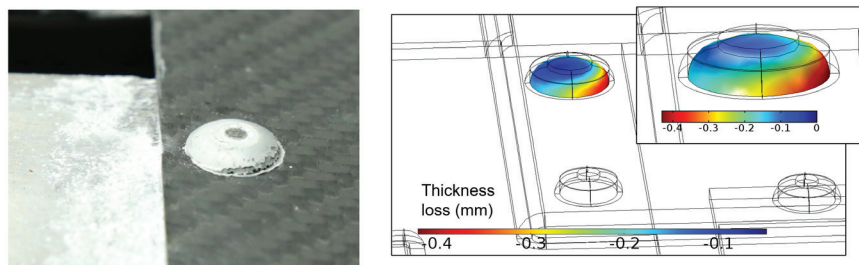


图 7. 利用瞬态分析(右)研究铝铆钉的溶解过程(左)。

图 9 显示了专门计算多材料复杂装配的电偶腐蚀现象的仿真 App, 使用者可以选择装配组件, 并定义电解质厚度、对流和温度。在仿真 App 运行期间, 用户可以生成电解质电位、电流密度和电极厚度变化的可视化绘图。利用由 NRC 编写的 MATLAB® 或 RStudio® 脚本, 用户还可以导出定制的结果报告, 以便进一步分析数据, 并按照客户提出的规格进行调整。

不仅如此, 仿真 App 还加强了负责整车性能开发的工程师与腐蚀工程师之间的沟通协作。使用仿真 App 之前, 如果改变几何结构或更换材料的做法不是常规操作, 或者造价更高, 开发整车性能的工程师往往会选择避免这些改变, 因为他们无法清晰预见这些变化带来的好处。全面部署仿真 App 后, 腐蚀工程师可以为设计人员提供更详实的理论依据, 并明确指出腐蚀产生的位置和原因。

“我们的下一阶段目标是让 ALTec 成员能够在仿真 App 中选择汽车的装配位置, 这款专业的预测工具可以帮助他们更加准确地表征模型中的电解质。COMSOL Server 开启了近乎无限的可能性, 卓越的灵活性使其能够轻松适应客户的具体需求。”Gallant 评论道。

⇒ 在轻量化设计中独占鳌头

多物理场仿真和仿真 App 降低了在设计进程中选择合适材料和几何结构的难度, 为推动铝材料在新型轻量化设计中的应用提供了有力的支持。加拿大国家研究院的研究团队及其行业合作伙伴将不懈地致力于铝合金制造业的技术革新, 推进铝合金在汽车轻量化设计中的应用, 进而为整个汽车行业的发展做出贡献。❖

电子邮箱: Danick.Gallant@cnrc-nrc.gc.ca

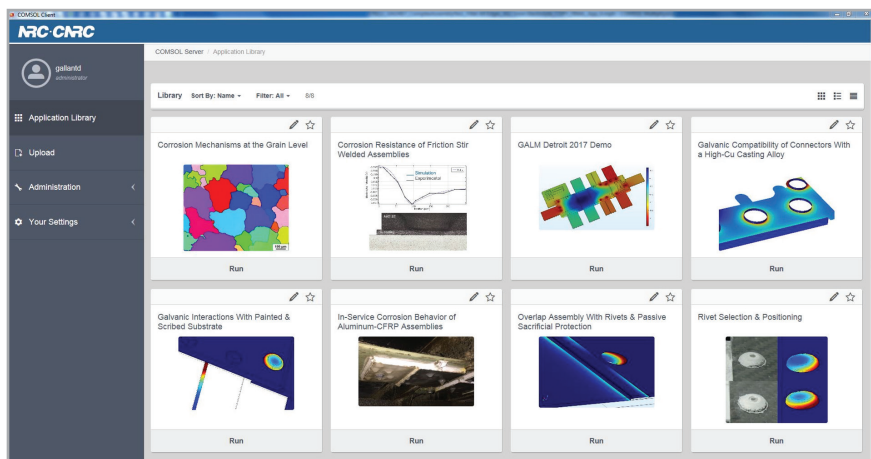


图 8. 通过网页浏览器访问显示 NRC 商标的 COMSOL Server™ 视图。

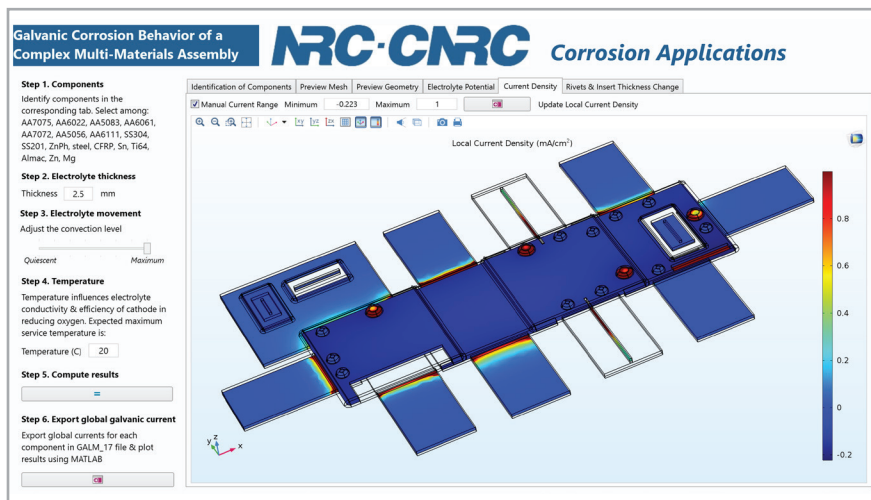
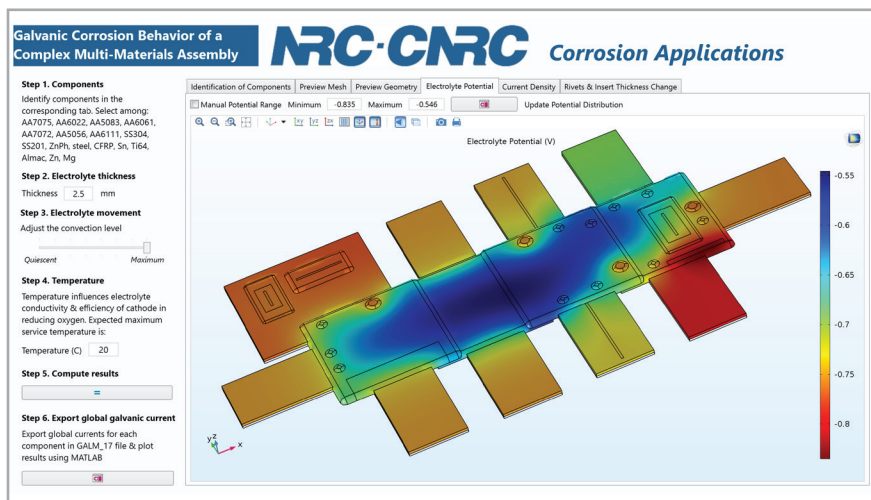


图 9. 用于分析复杂多材料装配电偶腐蚀行为的仿真 App。上: 整个装配中的电解质电位。下: 整个装配中的电流密度。

磁力传动技术 延长海上风力发电场的使用寿命

丹麦 Sintex 公司使用多物理场仿真对非接触式磁力联轴器进行开发和分析。基于这种磁力联轴器的传动系统具有更高的可靠性和密封性, 装置内的介质可以实现完全隔离, 能够在海上风力发电机和化工泵的应用中扮演重要角色。

作者 **ZACK CONRAD**

无论是汽车发动机、风力涡轮机, 还是随处可见的腕表, 扭矩转换和旋转功率的传递都是众多技术的重要组成部分。

传统的传动系统通常利用一组机械齿轮或轴来进行扭矩和功率的传递。机械传动装置中的连续接触部位容易受到摩擦、磨损和过载的影响。随着传动技术的应用不断向着更加恶劣和极端的环境扩展, 机械传动装置的局限性可能造成严重危害。在交通不便、环境恶劣的地区, 更换故障的传动装置是一项极具挑战的任务, 需要付出巨大的代价。

⇒ 无摩擦动力传递

Sintex 公司的工程师开发了一套具有更高稳定性和可靠性的新型传动系统: 磁力联轴器。这种联轴器的特别之处在于动力的传递是依靠磁力而非机械力来实现, 因此避免了接触和磨损, 大幅延长了传动系统的使用寿命。扭矩联轴器的动力传递依靠同轴的永磁体阵列(图 1)。当电源开启后, 一个驱动器开始转动, 它与另一个驱动器间的耦合磁场会带动另一个驱动器以相同的速度转动。该系统中的旋转功率传递与机械传动装置相似, 但是由于没有摩擦, 所以不存在过载风险。如果电机传递的扭矩过大, 则联轴器会限制对轴施加过量扭矩, 这一机制可防止轴所承受的扭矩值超

过设计极限, 从而保证系统能够在预期工作条件下持续运行。

对于海上风力发电机和采用复杂泵系统的行业来说, Sintex 的非接触式磁力联轴器是一款理想的产品。海上风力发电场因发电量大的优势而备受关注。然而由于风机零部件维修难度极大, 因此这些零部件需要具备高度的可靠性。在单台涡轮机中, 磁力联轴器将能量从电机传递给水泵, 用于全天 24 小时冷却电子元件。由于海上风力发电系统的远程离岸安装, 预防性维护或维修任务非常繁重, 且成本高昂, 因此磁力联轴器的可靠性成为了重中之重。驱动器之间的间隙可以轻松容纳一个隔离密封套(图 2), 其作用是隔离不同的介质, 形成密封系统。这类系统主要用于化工和食品工业, 在化学品和有毒物质的运输、混合、搅拌和研磨过程中, 无泄漏泵系统的重要性不言而喻。

⇒ 磁力联轴器的广泛应用

Sintex 生产的磁力联轴器具有广泛的应用范围。不过在实际应用中需要根据给定的约束条件进行个性化定制, 例如满足重量或材料要求, 符合几何结构限制等。在设计过程中, 工程师需要反复修改磁体的形状和材料, 才能设计出符合客户需求的产品。由于磁体样机的制作成本高、耗时

长, 工程师希望在不用构建样机的情况下就能改进设计。为了节省时间, Sintex 使用多物理场仿真来表征各种构型, 并为设计创建虚拟原型。Flemming Buus Bendixen 是 Sintex 公司从事磁性材料研究的专业人员, 拥有二十多年的仿真分析经验, COMSOL Multiphysics® 是他近十年最常用的仿真工具。

“在我看来, COMSOL 最大的优势是支持各种类型的仿真; 你可以在软件中添加多种物理场, 并模拟它们之间的相互作用。”Bendixen 评论道。他的团队建立了大量完善、复杂的模型。这些模型经过了严格的验证和确认, 赢得了团队的充分信任。仿真模型不仅帮助工程师团队节省了时间, 使他们可以将更多的精力和资源集中在完善细节上, 同时为 Sintex 的客户节约了成本。

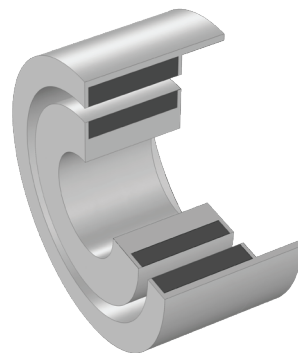


图 1. 磁力联轴器结构示意图。

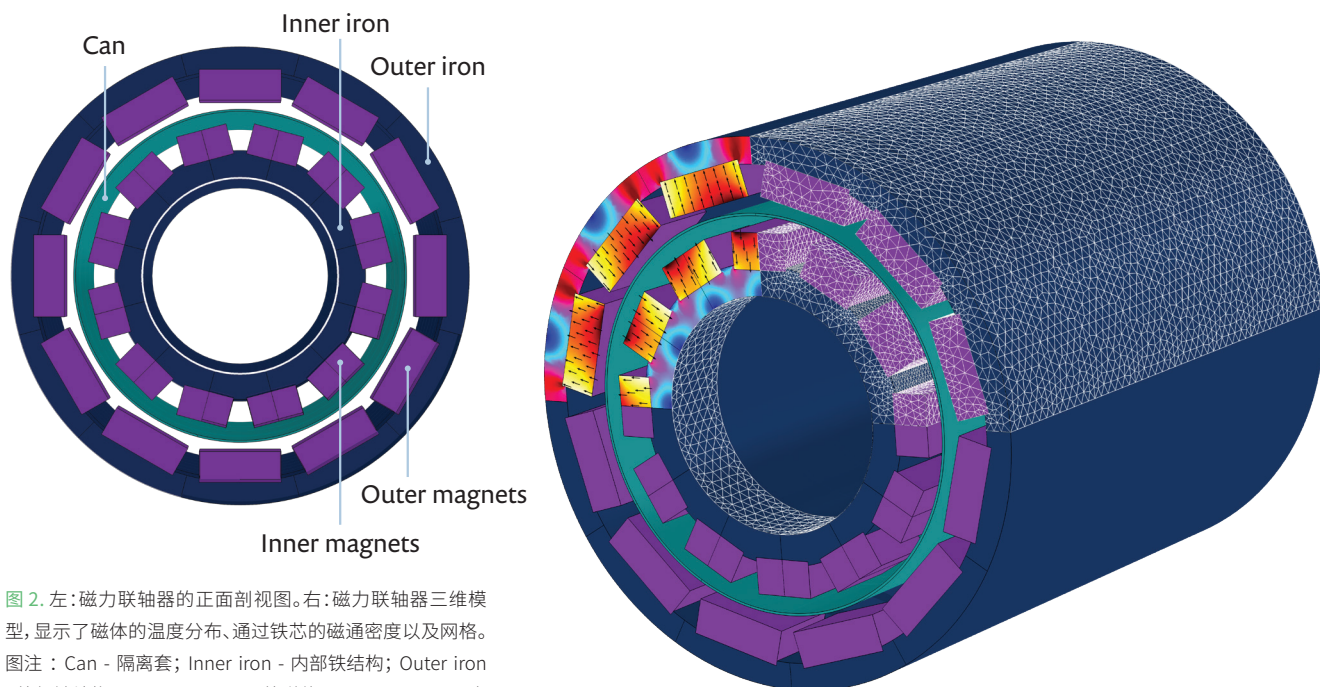


图 2. 左: 磁力联轴器的正面剖视图。右: 磁力联轴器三维模型, 显示了磁体的温度分布、通过铁芯的磁通密度以及网格。
图注: Can - 隔离套; Inner iron - 内部铁结构; Outer iron - 外部铁结构; Outer magnets - 外磁体; Inner magnets - 内磁体

⇒ 革新设计, 消除风险

磁力联轴器的主要作用是沿轴传递最大的扭矩和功率。Bendixen 使用多物理场仿真来研究磁力联轴器驱动器之间的相互作用, 并计算出从外部驱动器传递给内部驱动器的扭矩。Bendixen 通过多种方式来计算扭矩, 包括麦克斯韦应力张量法、后处理积分法以及 Arkkio 方法。经过与实验结果对比, 仿真分析的误差只有 1%, 模型的准确性得到了充分验证。在新设计的开发过程中, 该模型可用于研究特定结构中传递的最大扭矩。

考虑到永磁体磁场会带来许多负面效

“在我看来, COMSOL 最大的优势是支持各种类型的仿真; 你可以在软件中添加多种物理场, 并模拟它们之间的相互作用。”

— FLEMMING BUUS BENDIXEN, SINTEX 公司磁性材料专业研究人员

应, Bendixen 努力通过仿真来模拟它们产生的影响。在联轴器的钢制隔离套等金属材料中, 外磁场会引起涡流, 从而产生电损耗。“南北磁极的变化会在钢结构内产生电压, 系统会由于钢的导电性而产生能量耗散。” Bendixen 解释说。对于这种被称为隔离套涡流损耗的现象, 研究团队希望利用软件中的后处理工具对其进行分析, 力争将这类损耗降至最低。该团队使用内部开发的仪器对设计中的隔离套涡流损耗进行了实验测试。仿真结果和实验结果只有百分之几的差别, 进一步证明了模型的准确性。

“我们致力于捕捉磁性材料的真实非线性特性。COMSOL 软件为我们提供了强力支持, 确保阵列达到最佳磁化效果。” Bendixen 表示。团队在仿真(上图)中采用了高度非线性的磁滞曲线, 并依据曲线和材料温度的相关性来调整磁负载, 由此来防止永磁体达到临界温度而产生不可逆的退磁。这对于确保产品的可靠性来说至关重要。“确定磁体能承受的最高温度是极其重要的, 我们现在可以非常准确地计算出温度上限值。” Bendixen 补充道, “磁体一旦过热, 就可能产生局部退磁。”

Bendixen 进一步发掘了多物理场仿真的灵活性, 通过导入 Sintex 的磁性材料库, 可以对各种磁体构造进行定制化设计。

⇒ 仿真人员的“得力助手”

Sintex 在创建含有足够细节的复杂模型后, 便会着手扩大模型的使用范围, 让非仿真专业人员也能使用这些模型进行仿

真分析。以前，销售人员和其他没有仿真经验的同事需要对设计进行测试时，他们就会请求 Bendixen 帮助完成所有的计算工作。

为了能够让同事们尽快得到仿真结果，Bendixen 基于多物理场模型开发了仿真 App，仿真的效率和便捷性都因此达到了前所未有的高度。目前在 Sintex 公司，多达二十位用户正在使用十款不同的仿真 App。这些仿真 App 都是直接在 COMSOL Multiphysics® 中利用“App 开发者”工具创建的，用户只需要连接到 COMSOL Server™ 就能通过网页浏览器进行访问。仿真 App 直观的用户界面和简易的部署方式让所有员工都能轻松使用。公司甚至可以为重要客户开放这些仿真 App 及其计算功能的使用权限。“我之所以开发仿真 App，是因为一些同事不熟悉仿真软件，但又希望自己运行系统测试和仿真分析。仿真 App 让这一切成为了现实。”Bendixen 说道。

借助仿真 App，用户无需修改底层计算模型就能调整设计参数。“销售人员可以通过电话与客户确认产品需求规格，并在短短几分钟内，快速修改模型尺寸并运行仿真，及时为客户提供所需的数据。”Bendixen 说。仿真 App 虽然界面简单，但具有极强的灵活性，为设计创新提供了充足的发挥空间。用户可以在 Sintex 开发的仿真 App 中调整几何参数和磁性参数，然后基于这些参数计算磁体的临界温度、剩磁分布、磁通密度、扭矩和隔离套涡流损耗等。图 4 显示的仿真 App 示例用于模拟隔离套中产生的涡流，得到的电流值可以用于计算系统的功率损耗。现在，各个开发阶段涉及的人员都能参与到设计过程中，为最大限度地提高产品可靠性贡献自己的力量。



图 3. 标准的磁力联轴器。

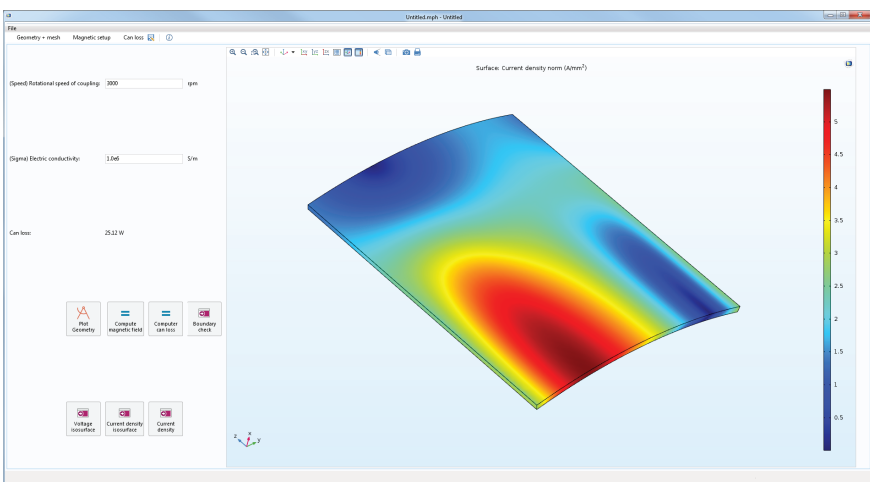


图 4. 仿真 App 模拟了隔离套内的感应涡流密度，并计算由此引起的能量损耗。

⇒ 展望未来

Sintex 目前正在开发一种新型的磁阻式传动装置，用于进一步扩大传动装置的应用范围。这种装置不仅可以实现可靠的非接触式磁力传动扭矩，还可以改变驱动器之间的速度或扭矩，从而在传动比固定的情况下发挥机械优势。新型传动装置具有独特的设计，其中加入了一块磁化方向与轴平行的永磁体，极大地简化了装配结构。在仿真 App 的帮助下，更多人员能够参与分析过程，这就使 Bendixen 能投入更多的时间和精力专注于改进 Sintex 的磁技术。❖



Flemming Buus Bendixen, Sintex 公司磁性材料研究员。

顺应潮流, 优化流量传感器

瑞士恩德斯豪斯 (Endress+Hauser) 公司的产品开发人员正着力提高流体传感器的灵敏度, 以期在水、食品、制药和石油天然气行业提供精密的流体密度、粘度、质量流量和温度测量设备。

作者 **VALERIO MARRA**

我们生活中使用的汽油、饮用水, 或是饮用果汁, 这些常见的液体其实都是经过了层层提取、处理和质量评估后才进入了我们的日常生活。消费者赖以生存的种种液体背后都伴随着许多深思熟虑和不为人知的先进技术, 而这些技术都离不开精确的测量和监控。

在加工药品时, 我们如何判断流体是否符合高质量要求? 加工原油时, 如何确定原油提取量? 在水的输送过程中, 又如何确定流量和体积分布?

这些问题与水、制药、食品和石油天然气公司的利益息息相关。制造商为了能够自信地回答这些问题, 提出了有效的解决方法: 使用安装在管道或其他设备内部的流量计。在瑞士恩德斯豪斯 (Endress+Hauser) 公司, 工程师们正在努力地推进各类流量传感器的开发和维护工作, 不断提高传感器的精度, 并针对不同物

质使用不同的测量方法。

⇒ 基于科里奥利力的测量

为了确定管道内流体的特性, E+H 公司设计了一款由一根或多根振动测量管组成的传感器, 通过测量管道内部装置中的科里奥利力, 实现流量的精确测量。

在流体流入装置之前, 测量管已经处于激活状态。当装置充满静止的液体后, 测量管开始匀速振动。当液体流经振动管时, 会对管壁施加作用力, 测量管的振动可以看作是流体粒子绕轴进行旋转。由于流体粒子在运动参考坐标系中流动, 因此会受到一个垂直于其运动方向和旋转轴的惯性力, 即科里奥利力。与此同时, 由于振动管的入口段和出口段的流体会产生反相的旋转运动, 由此产生的力会以不对称的方式使管发生偏移, 导致沿管的振动会产生相位差或时间差。

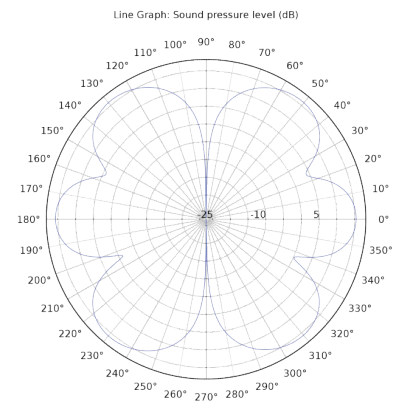
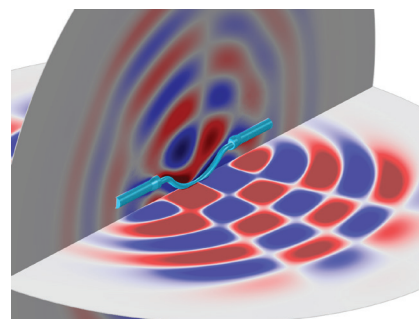
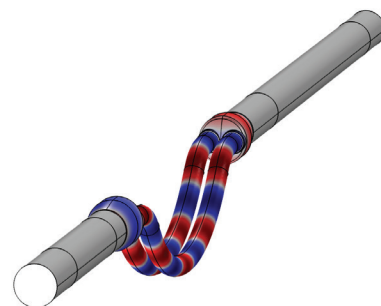


图 2. 仿真结果显示振动管内部 (上) 和周围 (中) 的声场分布, 以及以 dB 为单位的声压级图 (下)。

管道运动的扭曲分量引起测量管的各个管段以一定的时间差或相位差开始振动。相位差和新的管振动频率分别为管内质量流率和流体密度的函数。因此通过解释流量计输出的信号, 就能测得质量流量或体积流量, 从而保证输送的流量符合预期。

除此之外, 流体粘度增大会导致振动阻尼增加, 通过振动频率就可以直接测得流体密度。举例来说, 与水这样的高密度、低粘度流体相比, 油类等低密度、高粘度物质的振动更快, 但阻尼更大。由此可见, 通

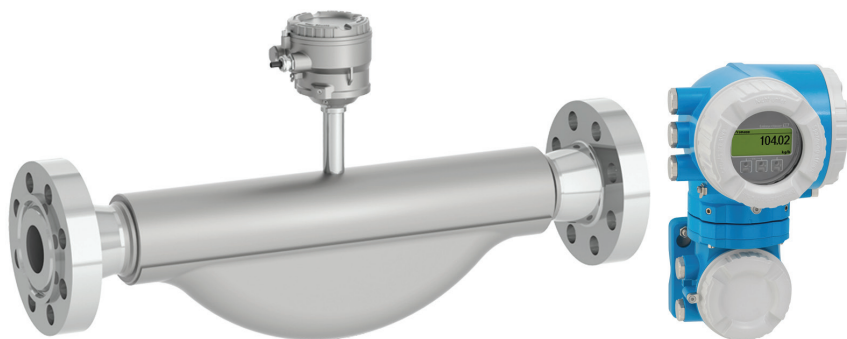


图 1. E+H 公司设计的科里奥利流量计。

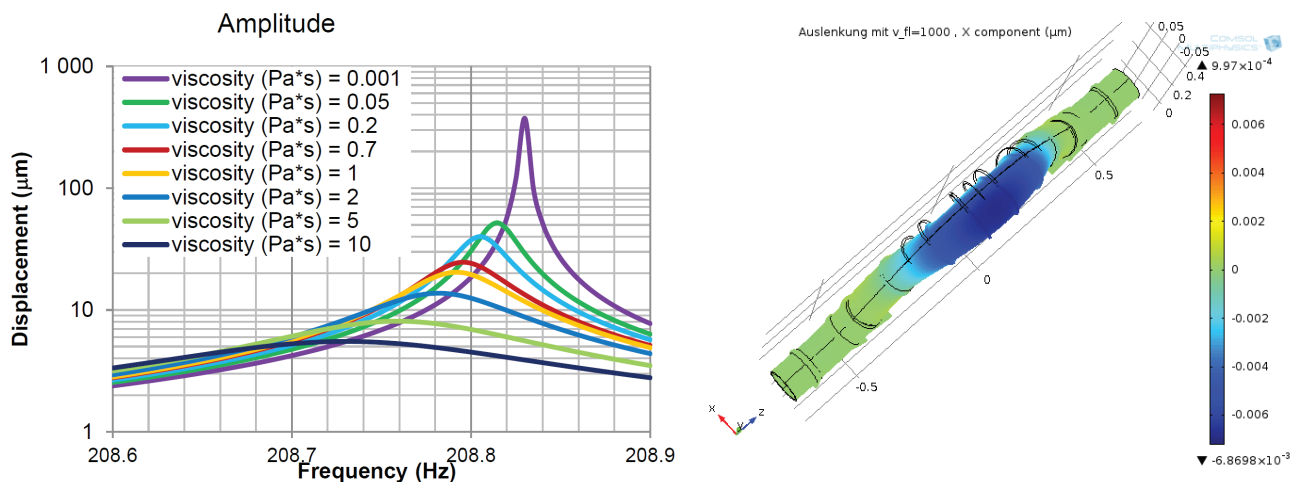


图 3. 仿真结果显示了不同流体粘度下测量管振动频率的变化情况及其对应的机械位移。右侧的结果图显示振动引起的管变形。

过测量振动频率和阻尼,就能确定流体的密度和粘度,从而对流体流动过程的质量进行监测控制。这些物理效应也同样适用于悬臂等在流体中振动的物体。

⇒ 粘性声学分析案例

恩德斯豪斯 (Endress+Hauser) 集团是全球领先的流量计 (图 1) 制造商, Vivek Kumar 是其瑞士总部的资深数值仿真专业人员, 致力于提高传感器的性能。他的建模工作帮助整个团队加深了对流量计中的声学、力学和流体流动等各种物理效应的理解。在深入了解流-固耦合及振动声学对传感器性能的影响后, 团队通过调整各种设计参数, 确定了最佳设计方案, 使流量计的性能和质量得到大幅提升。

团队从粘性声学模型着手进行数值分析, 目的是了解粘性流体通过振动管时产生的粘滞阻尼。他们在频域内模拟了流-固耦合, 研究结构变形和声

“我们依靠仿真技术详细分析了各种流体工况, 最终顺利完成了设备的设计优化, 能够帮助客户准确表征他们正在使用或提取的流体的材料属性。”

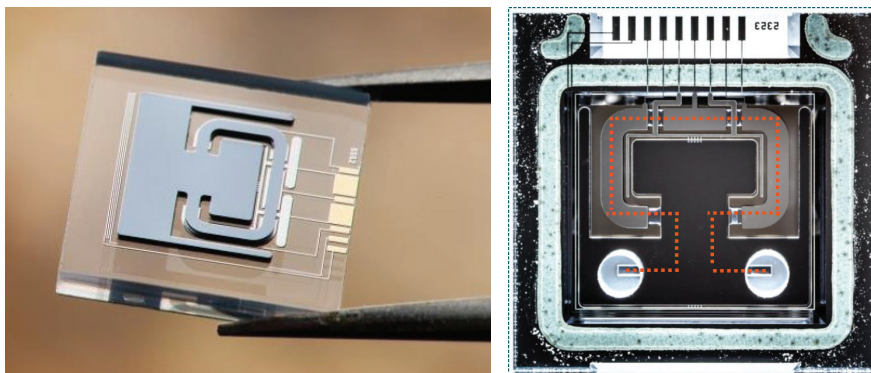


图 4. 用于测量密度和粘度的 MEMS 科里奥利芯片。左: 用镊子夹住的完整传感器。右: 器件内部的芯片版图。

波传播的耦合特性, 以期预测流量计对不同流体的响应。图 2 显示了湍流产生的声波在流量计中的传播情况。“我们尝试使用 COMSOL Multiphysics 来评估由流体引起的噪声对周围环境和流量计的影响。”团队解释说。

工程师分析了流体的粘性对测量管振动频率的影响。图 3 显示的仿真结果可以用于预测不同粘性的流体通过管道时, 管道的振动频率和

位移。借助仿真软件模拟引起流量计频率输出偏移的物理效应后, 团队有了更深入的认识, 他们能够合理利用这些效应来改进流量计的性能 (包括消除其中的不良效应)。在本例中, 测量管的阻尼变化被用于补偿因粘性造成的密度测量误差。

“我们需要清楚地了解不同流体对传感器性能产生的影响。”他们评价道, “我们依靠仿真技术详细分析了各种流体工况, 最终顺利完成了设备的设计优化, 能够帮助客户准确表征他们正在使用或提取的流体的材料属性。”

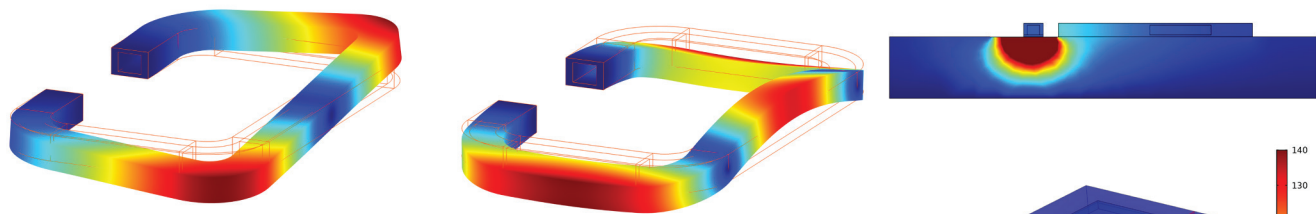


图 5. 振动微通道的两个特征模态, 不同颜色表示通道各个区域的相对位移水平。

⇒ 微系统分析案例

恩德斯豪斯集团的子公司 TrueDyne Sensors AG 在开发 MEMS 器件产品时也是基于类似的理念。研发设计并测试各种振动传感器, 用于在许多不同的应用领域测量流体的热物理性质。该团队根据客户具体需求, 为客户提供定制的传感器解决方案。因此, 明确哪一种类型的振荡器能够在特定工况下表现出最佳的灵敏度便是重中之重。

MEMS 科里奥利芯片 (图 4) 采用独立的振动微通道, 其工作原理与体积较大的科里奥利流量传感器相同。与前文的科里奥利流量计仿真相似, 通过微通道执行振动分析, 确定流道两端的基本特征模态和振动速率 (图 5)。这种特殊传感器的作用是计算惰性气体、液化石油气、碳氢燃料或冷却润滑剂等流体的密度和粘度。由于其体积小, 非常适用于测量极少量的流体。

然而, 这种小型设备面临的一个难题是: 一旦发生电气故障, 施加在传感器上的用于驱动激励的高压可能导致器件的温度升高。为了消除潜在风险, 团队对器件进行了热分析 (图 6) 来确定芯片的发热位置, 并判断流体是否会因为器件的温度升高而过热。结果表明, 流道周围的真空室可以最大限度地降低电极和流体之间的传热, 从而确保温度不会超过限值。

⇒ 满足企业和客户的需求

两支团队一致认为 COMSOL 多物理场仿真软件强大的灵活性在研发工作中起到了至关重要的作用。团队成员可以在软件中调整流量计的各类参数以提升产品性能, 全面满足客户需求。借助多物理场分析, 他们能够了解各种现象背后的原理, 减少了测试和制作样机所需的时间和精力, 为专注生产高质量的传感器铺平了道路。

恩德斯豪斯的 Christof Huber 博士

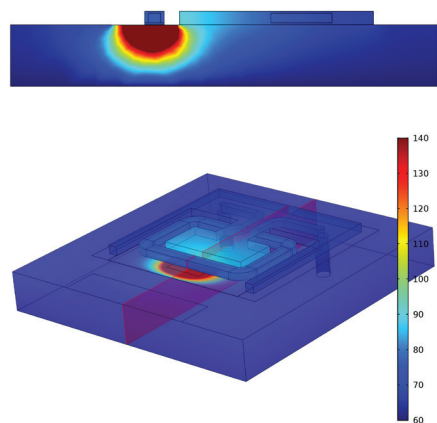
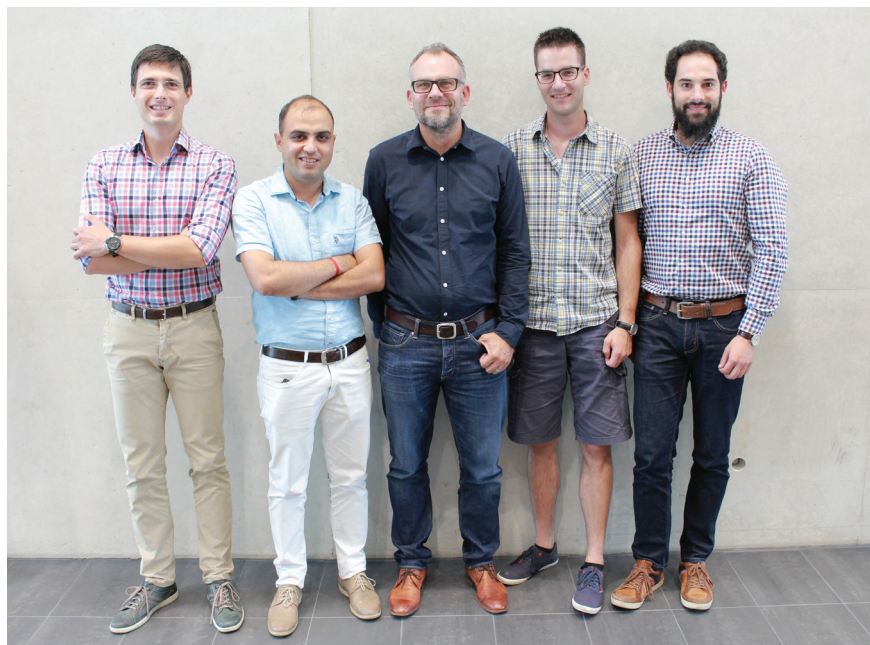


图 6. 热分析结果显示 MEMS 科里奥利芯片内部温度分布。

看到自己的建模成果对设备的设计优化起到了积极的促进作用, 并因此改善了客户体验时, 他深受鼓舞: “这些工具的作用是为客户解决问题。我们在现场看到自己的创新成果转化为现实, 这种成就感就是我们前行的动力。” ✨



从左到右依次为: Anastasios Badarlis、Vivek Kumar 博士、Christof Huber 博士、Benjamin Schwenter 和 Patrick Reith。

E+H Flowtec AG 公司隶属于 Endress+Hauser 集团, 总部位于瑞士赖纳赫。Truedyne Sensor AG 是 E+H Flowtec AG 的子公司。

Endress+Hauser 
People for Process Automation


仿真 App 加快摩擦润滑研究进程

德国慕尼黑工业大学齿轮研究中心的研究人员将他们开发的多物理场模型封装成仿真 App, 用于模拟热弹性流体动力润滑齿轮的接触性能, 为求解复杂的结构力学、传热与计算流体动力学多物理场耦合问题提供了许多宝贵经验。

作者 **VALERIO MARRA**

弹性流体动力润滑 (elastohydrodynamic lubrication, 简称“弹流润滑”) 研究充分反映了 21 世纪工程仿真问题的复杂性。弹流润滑描述两个啮合面 (如轴承和齿轮) 的变形与使其分离的流体动力学之间的耦合效应。如果在研究中引入热效应, 就演变为热弹性流体动力润滑 (下文简称“热弹流润滑”) 问题。润滑油膜厚度通常为微米级或更小尺度, 但足以保障其良好的低摩擦磨损特性。深入了解热弹流润滑机制, 有助于改进传动系统的功率密度、效率以及噪声、振动与声振粗糙度 (NVH) 性能。

在机械零件润滑接触的设计过程中, 非常关键的一点是将润滑油本身也当作机械零件来处理。借助热弹流润滑仿真, 研究人员能够全面分析润滑接触, 减少制造物

理原型的数量。实践证明, 使用多物理场建模和计算机仿真来分析热弹流润滑接触, 正是解决此类问题最有效的途径 (图 1)。

⇒ 应对微米级测量难题

由于润滑油膜和固体变形都是微米级尺度, 如果通过在接触区域放置传感器来进一步了解热弹流润滑性能将极为困难。“两齿侧面间的润滑油膜厚度在一微米以内, 约为头发直径的十分之一。接触压力一般高达 2 GPa, 几乎相当于一块指甲大小的地面承受 30 辆乘用车时受到的压强。” Thomas Lohner 解释道, 他在德国慕尼黑工业大学 (TUM) 的齿轮研究中心 (FZG) 担任弹流润滑摩擦接触和效率研究部门主管。

借助数值仿真, 工程师们能够设计各

式热弹流润滑接触方案, 最终实现齿面与润滑油的合理搭配。仿真分析的难点在于热弹流润滑是一个多物理场耦合问题。润滑油是一种流体, 因此模型需要引入计算流体动力学 (CFD), 其中主要求解修正雷诺方程 (纳维-斯托克斯方程的简化形式)。粘度等润滑油性能在很大程度上取决于压力和温度变化。此外, 润滑油的流动特性在高剪切速率下会变为非线性流动。润滑薄膜内的剪切和压缩作用会产生接触热, 热量通过对流和传导进行传递。温度变化会影响润滑油性能, 从而影响流体动力学表现, 最终产生弹性变形, 变形行为又反过来影响热量的产生。每个物理量之间都存在相互影响, 由此形成高度非线性的迭代循环, 其中包括耦合结构力学分析揭示的齿面弹性变形。

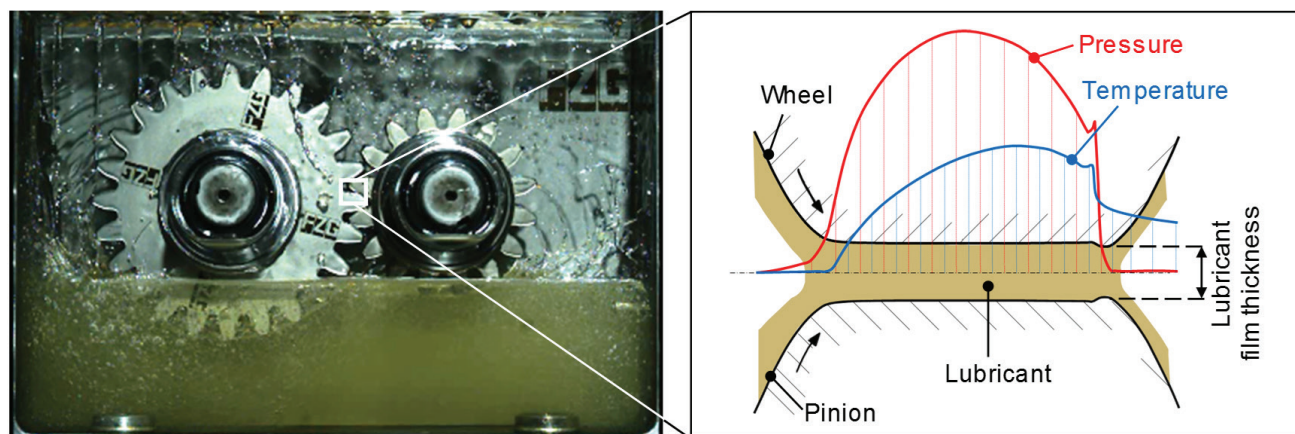


图 1. 正在运转的浸油润滑齿轮副的高速摄影图片 (左) 和弹流润滑接触示意图 (右)。图注: Wheel - 大齿轮; Pressure - 压力; Temperature - 温度; Pinion - 小齿轮; Lubricant - 润滑油; Lubricant film thickness - 润滑油膜厚度

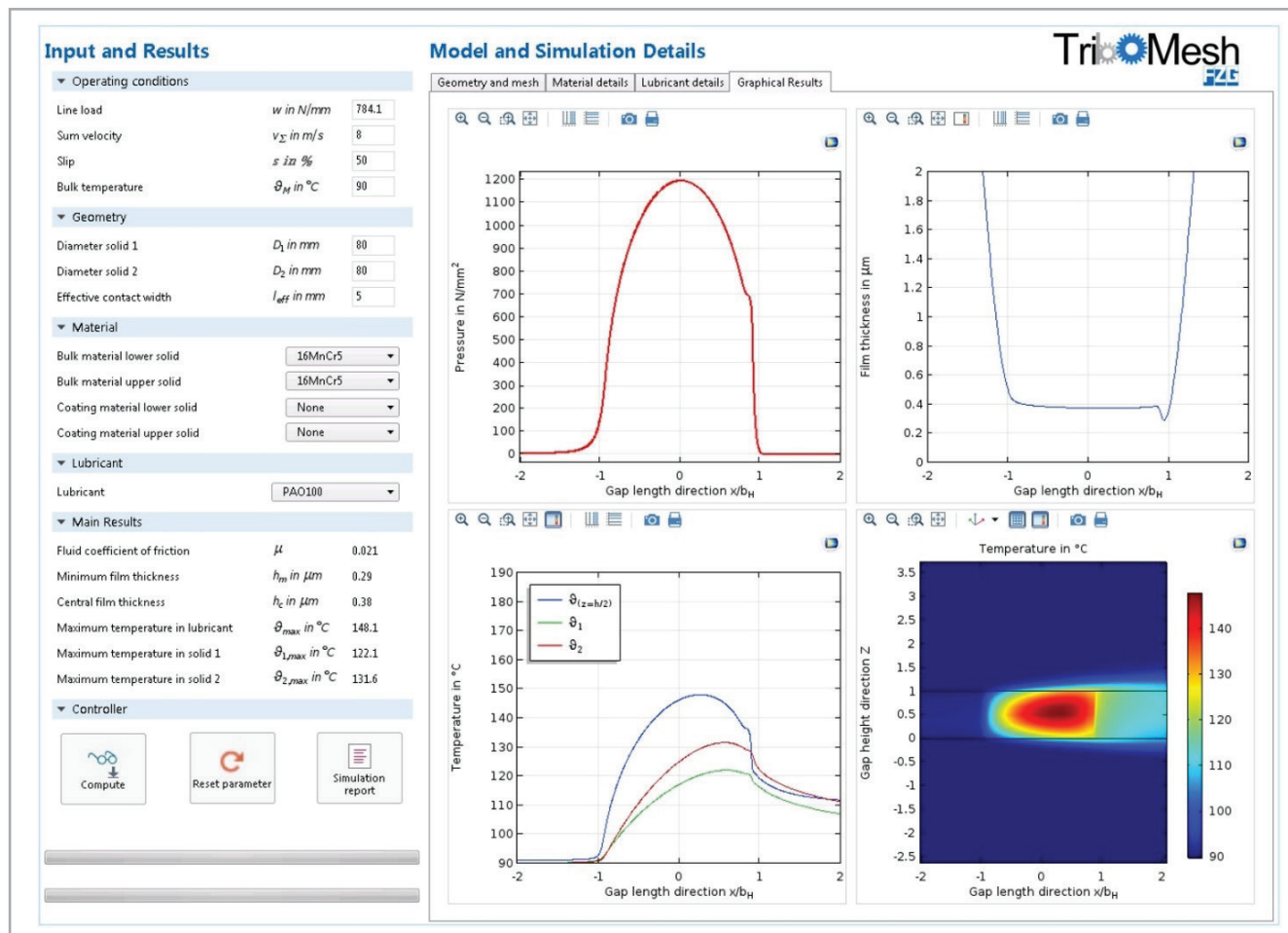


图2. 定制的仿真 App, 将复杂的热弹流润滑多物理场耦合求解结果封装到一个简单易用的工具中, 可供研究中心的所有人员访问使用。

⇒ 从纸上设计到仿真模型, 再到仿真 App

Lohner 和团队成员参考黎巴嫩美国大学 (Lebanese American University) 的 Wassim Habchi 教授发表的求解方法^[1]构建了一个仿真 App。然而, “纸上得来终觉浅”, 发表的数据并不代表实际的求解结果。“我们在 COMSOL Multiphysics 软件中使用了这个求解方法, 在整个分析过程中, 软件给我们带来了极大的便利。” Lohner 解释道, “我们不仅能够根据实际情况灵活地修正雷诺方程, 还能耦合其他物理场, 从而成功创建了

热弹流润滑数学模型。各种方程的自由组合与多物理场耦合是 COMSOL 软件的核心优势。”

软件的主要优势体现在支持用户选择不同的物理场、添加自定义方程, 并使用强大的全耦合功能得到精确的求解结果^[2]。在整个工作流程中, 用户无需了解具体的数值求解的技术细节, 从而将精力集中在建模上。“我们研究中心主要研究机械零件, 尤其是齿轮的设计和优化。” Lohner 解释说, “COMSOL 内置的各种接口和多物理场方法使我们能够专注研究工程问题, 而不必纠结于求解的数值算法。除此之外,

软件的持续开发和更新也让我们不断从中受益。”在计算压力和膜厚时, 研究人员使用“弱形式边界偏微分方程”接口来输入广义雷诺方程^[1], 并主要依靠软件提供的预定义接口来计算温度^[2]。

Lohner 和他的团队借助软件中的“App 开发器”工具创建了一款名为“TriboMesh”的仿真 App (图 2), 并在整个研究中心与同事分享他们的仿真工具。其他同事能够通过仿真 App 寻求更多新的解决方案, 极大地提高了团队的整体工作效率。

团队将仿真 App 部署到了本地工作

站，并授予一部分同事访问权限。在不久的将来，他们还计划利用 COMSOL Server™ 产品将仿真 App 分享给更多同事和项目合作伙伴，用户通过网页浏览器即可运行这些仿真 App。

这个仿真 App 的用途之一是分析类金刚石碳 (diamond-like carbon, 简称 DLC) 涂层可以在多大程度上提升齿轮的效率性能。“我们的试验台实验表明，与无涂层齿轮相比，DLC 涂层大大降低了齿轮的摩擦系

数。”Lohner 解释说。其原因何在？齿轮表面的涂层如何能够影响润滑油的性能？团队将所有实验数据输入仿真 App 进行分析，结果表明，DLC 涂层能将热量保留在热弹流润滑接触中，以此降低润滑油的粘度，进而减少摩擦（图 3）^[3]。“DLC 涂层确实具有隔热效果，如果没有仿真，我们就无法验证这一假设的正确性。现在，我们对系统中的热流和润滑油性能都有了深刻的理解。”Lohner 表示。

⇒ 化繁为简，步步为“赢”

Lohner 及其团队根据自身经验分享了多物理场建模和仿真 App 的使用心

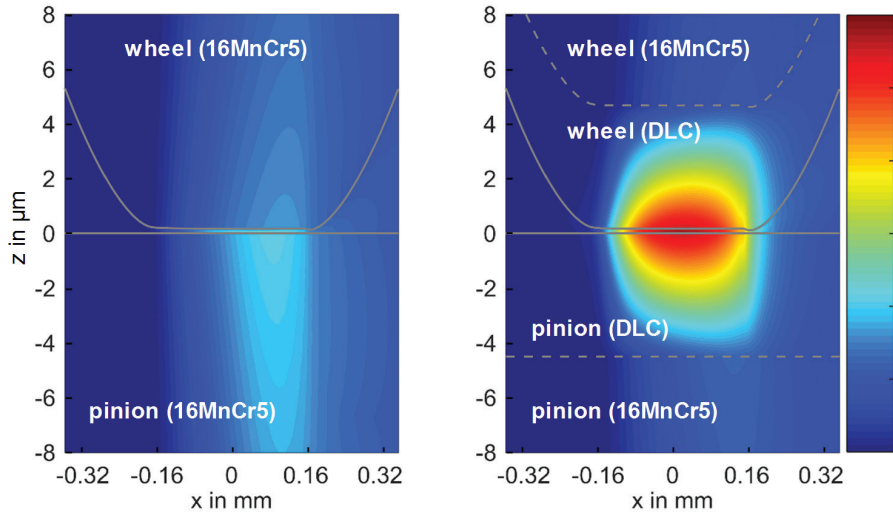


图 3. 热弹流润滑仿真结果：无涂层（左）和带 DLC 涂层（右）的齿轮副的温度分布。图注：Wheel - 大齿轮；Pinion - 小齿轮

得：“直接构建极其复杂的系统，并试图一次性解决所有问题，这几乎是不可能的。首先，我们必须最大程度地简化问题。”在此案例中，团队以修正雷诺方程作为切入点，将其与简单的弹性方程耦合求解，在这一阶段忽略了热效应。“随后，我们一步步加入更复杂的物理效应。令人欣喜的是，无论问题多么复杂，你都可以在 COMSOL 中进行模拟，并根据具体需求，轻松得到准确的求解结果。”他还特别强调，软件的强大功能并不意味着可以直接求解整个复杂物理问题。“面对复杂问题时，需要按步骤、有条不紊地逐一解决。在进入下一步之前，必须确保每一步都经过验证。”❖

参考文献

1. W. Habchi, *A full-system finite element approach to elastohydrodynamic lubrication problems: application to ultra-low-viscosity fluids [Dissertation]*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France, 2008.
2. Thomas Lohner, Andreas Ziegler, Johann-Paul Stemplinger, and Karsten Stahl, *Engineering software solution for thermal elastohydrodynamic lubrication using multiphysics software*, *Advances in Tribology, Volume 2016 (2016)*, Article ID 6507203.
3. Andreas Ziegler, Thomas Lohner, Karsten Stahl, *TEHL simulation on the influence of lubricants on the frictional losses of DLC coated gears*, *lubricants, Volume 6 (2018)*, doi:10.3390/lubricants6010017.



德国慕尼黑工业大学 (TUM) 齿轮研究中心 (FZG) 的弹流润滑摩擦接触和效率研究小组成员 (从左至右)：副研究员 Andreas Ziegler、副研究员 Enzo Maier、系主任 Thomas Lohner 以及 FZG 教授兼主任 Karsten Stahl。

声学超表面仿真成就完美音质

经过精心设计的声学超表面能够调控和引导声波, 产生负折射率等天然材料所不具备的声学特性。瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 的一支研究团队模拟了一种新型“主动式”声学超表面, 可用于提升音乐厅的音响效果, 改善住宅隔音效果, 还能够在飞机飞行过程中降低令人难以忍受的发动机噪音。

作者 **GEMMA CHURCH**

传统声学处理装置存在一个基本限制, 即装置尺寸限制了其应用频率范围(装置越薄, 低频吸声性能就越差); 或者只能依靠共振来增强声学效果, 因此被限制在很窄的频带范围内。举例来说, 在录音室录制音频的过程中, 会不断产生低频声音, 影响音频质量。通过在墙角放置薄膜吸声体(低频声陷)可以吸收低频声音, 美中不足的是, 吸声体只对共振频率附近的有限频率范围起作用。然而, 这些恼人的低频声音跨度较大, 通常为 20~200 Hz, 因此单一的声学处理方式无法在这一频率范围内达到较好的低频吸声效果。

⇒ 引导波前传播

设计一款完美的低频吸声产品是不切实际的, 可以想象, 这样的产品结构必然体积庞大, 而且难以优化。瑞士洛桑联邦理工学院 (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 简称 EPFL) 声学教研组负责人 Hervé Lissek 表示: “传统的薄膜谐振器只能在几赫兹范围内发挥作用, 这一限制使它无法成为主流应用。我们的想法是开发一款兼具宽波段和主动性的设计。” 沿着这个思路, 他们提出了主动式电声谐振器 (AER) 的概念, 设想将传统扬声器用作薄膜吸声体, 其声学特性可

以通过电气方式进行调整 (图 1)。

基于在 AER 研究中获取的宝贵信息, Lissek 和他的团队明确了声学超表面概念的含义。从根本上说, 声学超表面是由多个小型声学单元 (膜、微穿孔、腔等) 构成的表面, 表面整体具有各组成单元所不具备的超常声学特性。根据超表面概念, 这种微单元组合使得波长远大于单元尺寸的声波会受到影响, 因此这些基本单元具有“亚波长”特性。经过特殊设计的超表面具有吸声性能, 或者能够让波在超表面上以指定的角度进行反射。

⇒ 主动适配使声音更加优美

为了模拟声学超表面, 必须将该表面分解为亚波长的基本单元, 才能人为地改变声波波前, 得到期望的结果。Lissek 及其团队提出的主动式声学超表面是一个由亚波长扬声器振膜构成的表面阵列, 每个振膜都包含一个独立可编程的主动式声阻抗, 从而可以局部控制超表面的不同反射相位。

研究团队使用主动式控制框架来控制超表面的反射相位, 这一灵感源自 AER 设计概念。AER 可以通过电声控制的方法进行调谐或修改 (图 3)。Lissek 解释说: “我们能够通过电子系统来调整薄膜, 借



图 1. 主动式电声谐振器原型。图片来源: EPFL/Alain Herzog。

此改变超表面对声音分布的反应方式, 还能使薄膜主动适应传入的声音。举例来说, 假设您试图掩盖飞机的发动机噪音, 那么在不同的飞行阶段, 主动式声学超表面会根据发动机的频率主动调整超表面, 其范围在几百到几千赫兹不等。”使用单个扬声器振膜作为声谐振器时, AER 控制器可以在较大的范围内调整振膜的声阻抗, 在此过程中, 振膜的谐振频率变化可能超过一个倍频程。

利用这一概念, 你甚至可以让声波以指定模式进行反射。Lissek 补充说: “宽带噪声 (类似于光学中的白光) 入射到声学超表面后, 超表面可以起到声学棱镜的作用, 对噪声进行分解, 从而使不同频率的声音指向不同的方向。从艺术角度而言, 对各频段声音的随意操控蕴含着无限的可能性, 然而, 目前最切合实际的应用主要还是隔音降噪。”

⇒ 数值仿真赋予声学设计以生命

在模拟声学超表面及其周围的声学环

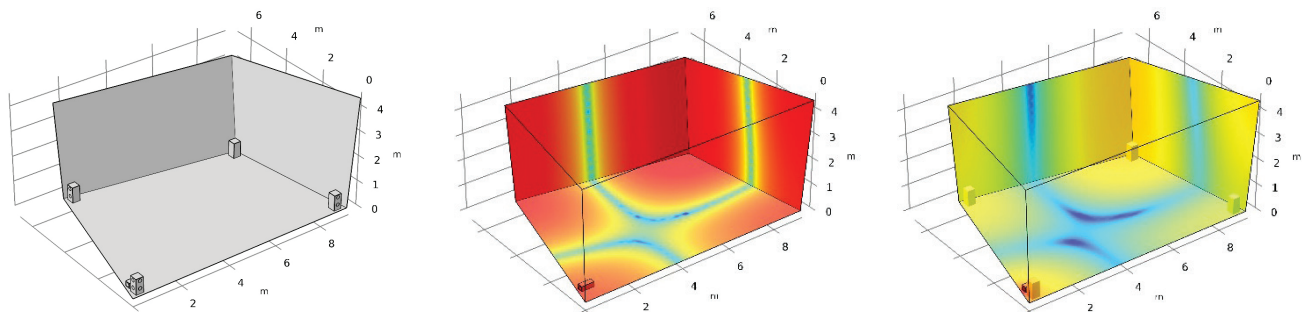


图 2. 左:混响室几何模型,其 4 个角落分别放置了一台 AER 原型。另外两个绘图依次表示频率为 35.3 Hz、110 模式激励的情况下,未放置与放置吸声器时室内的声压级分布。

境时,必须考虑许多复杂的现象。Lissek 表示:“在产品 设计过程中,借助 COMSOL Multiphysics,我们不仅能够评估设备的声学性能,还能精确分析设备中无法进行实验评估的物理量。”

接下来,我们在前面的录音室案例的基础上,继续进行研究。现在,房间的四个角落各放置了一个小型主动式吸声器(图 2),用于吸收低频声音。为了模拟这些设备的吸声方式及其对室内声场的影响,我们需要了解室内不同位置的声压分布。Lissek 解释说:“利用多物理场仿真,我

们可以对是否放置主动式吸声器这两种情况进行分析,即时地获取室内的频率分布。通过对室内声场分布进行模拟,我们可以得到一些重要的参数,例如在共振频率下,室内声音消散的模式衰减时间。”

“在软件的帮助下,我们可以在十秒内就完成所有工作。我们无需在空间的每一点都进行声学测量;只需使用软件在模型内随意移动吸声器,就能轻松绘制房间的声压分布图,并推断吸声器位置的改变对声压分布的影响。”Lissek 补充道。

⇒ 确定正确的方向,优化超表面设计

Lissek 和他的团队提出了许多不同类型的声学超表面设计,包括螺旋式声学单元、亥姆霍兹共振器和主动式声学超表面,并利用数值仿真进行了分析。

团队首先设置了单个 AER 单元的反射特性,用于确定这些基本单元的控制规律。接着,根据商用的标准电动扬声器,将确定的控制规律应用到 AER 基本单元,目标是通过实验评估沿超表面 32 个单元的目标反射相位的可行性(图 4)。当目标反射系数通过验证后,他们就对超表面进行建模,并执行了全波段仿真。“每一个单元的

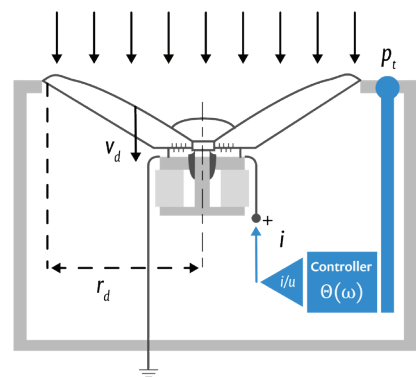


图 3. 主动式电声谐振器(AER)概念示意图。图注: Controller - 控制器

振动类似活塞运动,因此我们可以直接指定单个振膜的声阻抗。”Lissek 解释道。

团队采用入射角为 -45° 的平面波背景压力对两种工况进行了模拟。超表面上反射波的预定角度分别设为 60° 和 0° ,打破了由斯涅尔-笛卡尔(Snell-Descartes)反射定律得到的最大角度。图 5 和图 6 表示当 $f = 350 \text{ Hz}$ 时,这两个研究角度在 xz 平面上的反射声压级仿真结果。可以看出,在超表面基本单元上的声阻抗作用下,波前可以偏转指定的角度。

图 5 和图 6 表明,声波的最终方向与目标反射角基本一致,这证实了在相对较宽的频带(接近 350 Hz 的一个倍频程)范围

“在产品 设计过程中,借助 COMSOL Multiphysics,我们不仅能够评估设备的声学性能,还能精确分析设备中无法进行实验评估的物理量。”

— HERVÉ LISSEK, EPFL 声学研究组负责人

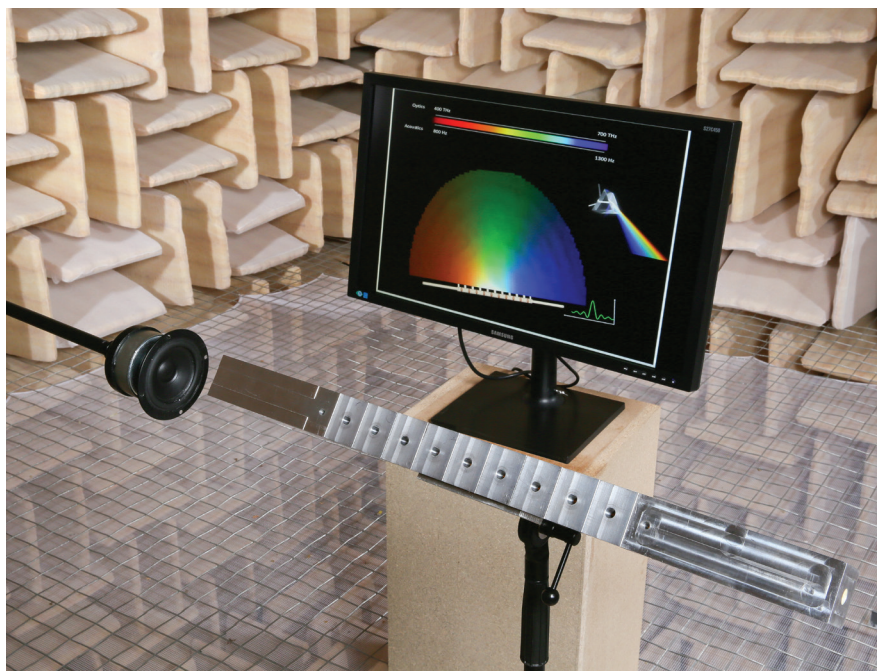


图 4. 声散射棱镜原型。图片来源:EPFL/Alain Herzog。

内, AER 对实现相干转向的有效性。见证了主动式声学超表面在更大频率范围内的显著效果后, 研究人员能够利用仿真继续专注于设计和实验研究。Lissek 补充道: “我并不认为自己是有限元建模方面的专家, 所以对我个人来说, COMSOL 多物理

场仿真的一大突出优势在于, 它通过简单直观的界面提供了许多功能强大的建模功能, 操作起来非常方便。”

⇒ 不懈地推进超表面研究

在下一阶段, 研究人员希望对声学超

表面进行全三维仿真。Lissek 解释说:

“在当前的初步研究中, 我们使用了简化的一维模型 (假设超表面沿 y 轴无限延伸), 主要是为了加快计算速度。但是为了能够获取更多信息, 我们需要创建三维声学模型, 并在三维域中加入真实的二维超表面, 详细了解反射波的特性 (例如, 在 x 轴和 y 轴截断超表面应该可以增强反射波的方向性)。”目前, 他们正在将集总电路建模集成到现有模型中, 以期深入了解声学域和主动控制系统的电学分量 (比如流入各个 AER 的电流) 之间的耦合作用。这种耦合分析还有助于他们开发先进的控制策略, 例如, 所有 AER 都实现电互连。

为了将工作成果转化为现实, Lissek 和团队成员正在探索如何将这种声学超表面与室内设计结合起来。“想象一下, 如果在剧院或音乐厅中布置声学超表面, 我们就能控制声反射的空间分布, 为观众创造和谐统一的音响效果。通过电控方式来操控室内声音传播, 这无疑是每个声学专业人员追求的梦想。” Lissek 总结道。❖

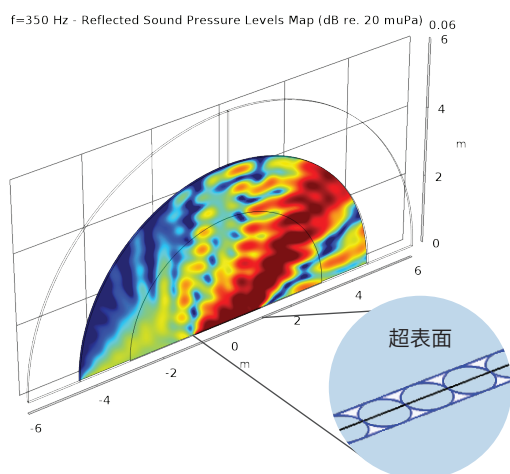


图 5. 频率为 350 Hz、指定反射角为 60° 时, 32×32 超表面基本单元阵列的反射声压级。

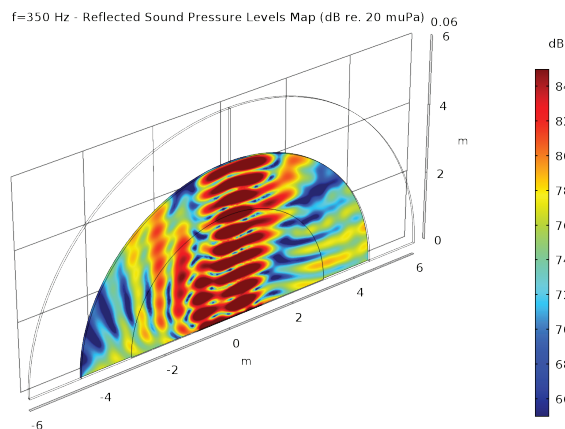


图 6. 频率为 350 Hz、指定反射角为 0° 时, 32×32 超表面基本单元阵列的反射声压级。

提高铁矿石烧结效率

工艺工程师们利用多物理场仿真研究钢铁烧结工艺, 为实现高效、节能、环保的钢铁大规模生产铺平了道路。

作者 **ZACK CONRAD**

不断追求质量和效率的提升是制造业永恒的主题, 其中以钢铁行业最为典型。由于钢铁生产的工艺链较长, 这就为整个制造流程未来的改进留下了充足的空间。德国钢铁协会下属的钢铁研究中心 (简称 BFI) 是欧洲领先的钢铁冶金技术研究机构之一, 目前正在使用多物理场仿真技术优化工艺配置, 实现制造流程的全面变革。

⇒ 准备符合高炉冶炼要求的烧结料

烧结是钢铁生产线的一个重要环节, 其过程是将铁矿粉与其他材料进行混合, 然后送入高炉中将金属熔融, 最终生产出成型钢。烧结工艺是将粉末混合料进行高温焙烧, 直至其熔合形成多孔介质, 然后再放入高炉中冶炼。如图 1 所示, 由铁矿粉、燃料 (焦炭) 和熔剂 (石灰石) 组成的原始混合料被送入设备点火烧结。与此同时, 主抽风机从料层底部抽吸空气, 使焦炭加速向下燃烧, 从而加速部分矿石的熔化和凝固、煅烧和干燥。

效率的提高主要表现为缩短工作完成时间, 对于制造业而言尤其如此。“如果能够加快工艺流程、缩短完成时间, 效率自然会提高。” BFI 研究人员 Yalcin Kaymak 博士解释说, “效率的提升不仅有利于提高产能, 还能实现节能减排。” 在烧结工艺中, 要缩短各工序完成时间, 主要依靠加速混合物的燃烧。此外, 整体效率还取决于混合物的渗透性和孔隙率、气体流速、温度场和烧结矿整体强度等多种因素。Kaymak 博士和 Hauck 博士以及双良克莱德贝尔格曼有限公司的 Hillers 博士利用数值仿真方法研究了上述因素的影响。

BFI 的研究人员开发了一种可行的解决方案: 采用水平和/或竖直放置的渗透性棒料在給料过程中提高原料混合物的透气性 (图 2)。随着输送带的移动, 水平放置的松料棒会在水平方向形成一个椭圆形局部通风区域; 竖直放置的松料棒会与填充床相切, 形成一个近似矩形的曝气区。在本例中, 这个区域是沿竖直棒轴的垂直面区域。松料棒起到增加填充床孔隙率的作用, 从而改

善燃料燃烧中的空气供给, 最终实现加快燃烧速度并提高效率。仿真工作的重点是优化松料棒的布置方式, 最大程度地增加孔隙率。

⇒ 烧结工艺的多物理场建模

铁矿石烧结的燃烧过程由一系列子过程构成, 包括传热、化学反应 (如熔化和凝固) 以及流体在多孔介质中的流动。这意味着, 如果希望准确地分析

烧结过程, 需要建立一个真正的多物理场模型, 从而能够有效地将这些物理场耦合到一个建模中进行研究。“COMSOL 软件不仅运行速度快, 还具有卓越的灵活性, 用户能够根据需要编辑表达式以及控制网格划分。” Kaymak 博士评价道。基于软件的灵活性, 研究团队在模型中输入了自主开发的孔隙分布数据, 这是表征原始混合料局部透气性的一个重要参数。为了确定孔隙分布, 研究人

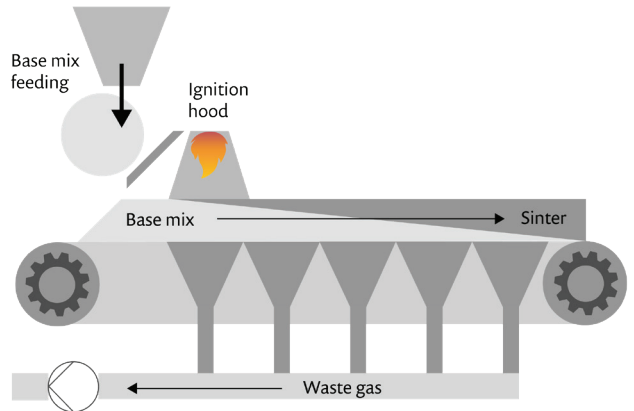


图 1. 烧结工艺示意图。图注: Base mix feeding - 原始混合料入口; Ignition hood - 点火器; Base mix - 原始混合料; Sinter - 烧结矿; Waste gas - 废气

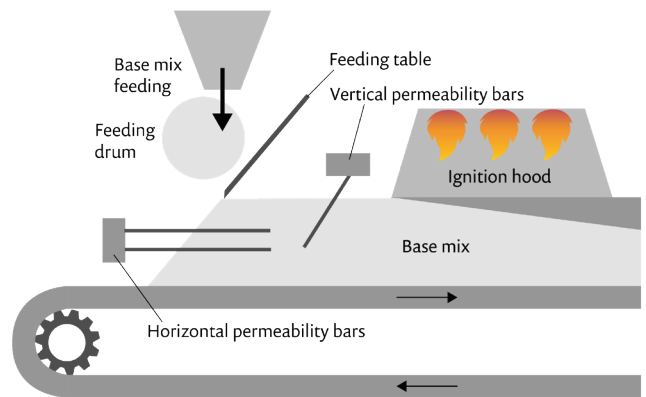


图 2. 增设了棒料的烧结工艺示意图。图注: Base mix feeding - 原始混合料入口; Feeding drum - 圆辊给料机; Feeding table - 进料台; Vertical permeability bars - 竖直松料棒; Ignition hood - 点火器; Base mix - 原始混合料; Horizontal permeability bars - 水平松料棒

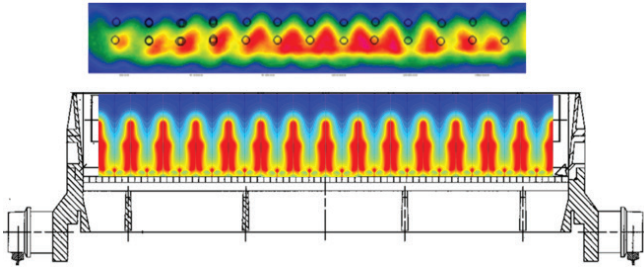


图 3. 废气排放高温区的测量结果(上)和仿真结果(下)。

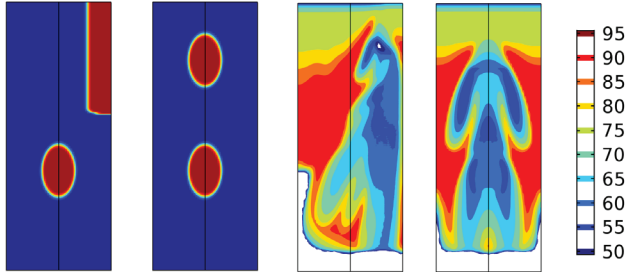


图 4. 两种松料棒布置的质量评估结果。

员通过实验对特定透气棒布置下的气流速度进行了测量。他们让空气流经混合料, 通过测量该过程中的空气流速确定孔隙分布, 然后将数据直接输入到软件中。

团队在得到孔隙分布并将其输入模型后, 接下来就可以对烧结过程运行瞬态仿真分析, 得到明确的温度分布, 并对各种不同的布置方式进行深入研究。此外, 他们还利用全局常微分方程的时间积分运算特征, 对许多相关物理量进行了计算, 综合表征了不同布置对烧结过程的影响。这些物理量包括输入输出的总能量、含水量、输入物质总量、点火器的总输入能量、输出物质总量和气体总量。

由于燃烧是烧结过程的重要组成部分, 因此特定布置下的温度分布对烧结时间和烧结矿强度有直接的影响。冷强度是评估烧结矿质量的一个关键指标, 这是因为高强度意味着烧结矿能够承受高炉冶炼过程中的恶劣条件。烧结矿强度可以通过转鼓测试的方法进行测量; 通常情况下, 高于熔点温度的燃烧时间越长, 烧结矿强度就越高。由此可见, 根据局部瞬态温度分布信息, 可以计算出局部冷强度, 进而得到整个横截面的质量分布, 如图 3 上图所示。

为了验证仿真的准确性, 团队将分析得到的温度分布结果与使用红外热成像技术观测到的烧结厂废气排放数据进行了比较, 充分证实了模型的可靠性。图 4 左侧为测量得到的热成像图, 其

中的小圆表示水平松料棒的位置; 从图中可以看出, 松料棒的位置与低温区域完全一致。仿真模型的计算结果也呈现出相同的趋势。

⇒ 仿真成果及未来工作展望

仿真结果表明, 松料棒的布置经过优化后, 烧结速度可以提高 40%。本例中的最佳布置方式可以是分上下两排水平放置松料棒, 如图 5 所示; 也可以在竖直放置的松料棒中间放入水平棒。目前, BFI 正力图在模型中加入更多的因素, 扩大模型的适用范围。他们接下来的目标是确保质量和强度在烧结过程中保持不变。

为了深入挖掘模型的功能并不断提高模型的准确性, 团队利用模型的可扩展性, 尝试在对方程中加入扩散和弥散效应, 以及更多的其他物理现象, 例如氮氧化物生成等。他们还计划使用 COMSOL 软件中的“App 开发器”工具创建简单易用的仿真 App, 为操作人

员提供技术支持。专业仿真人员可以定制 App 界面, 控制显示的输入输出数据, 使不具备仿真专业知识的用户也能够自如运行仿真 App, 并专注于相关参数的设置和调整。他们还

“COMSOL 软件不仅运行速度快, 还具有卓越的灵活性。”

— YALCIN KAYMAK, BFI 研究人员

可以通过 COMSOL Server™ 产品对仿真 App 进行部署, 使整个组织都能受益于多物理场建模带来的优势。操作工人关注的重点包括: 能量流、床层温度、排气温度、焦炭消耗量、煅烧、硫化作用、冷凝和烧结矿质量等。“很多操作人员都没有仿真经验, 不了解软件中的细节。” Kaymak 博士表示, “但自从有了直观易用的仿真 App, 他们就能将精力集中于参数的调整, 快速模拟参数变化对设计的影响, 即时查看效果, 从而优化参数设置。” ❖



图 5. 烧结厂给料系统, 安装了两排水平松料棒。

通过仿真 App 优化轿车设计

印度马恒达公司借助仿真 App 加速了产品的设计进程, 增强了团队协作意识。

作者 **ADITI KARANDIKAR**

对于当今的汽车制造商而言, 产品设计是一个反复迭代的过程, 需要计算机辅助工程 (CAE) 分析师、设计工程师、制造团队和供应商的团队协作才能完成。汽车行业的市场竞争已呈白热化趋势, 各类新车型的推出令人目不暇接。汽车制造商需要尽可能地提高协作效率、缩短新产品的设计进程, 才能在激烈的竞争中赢得优势。以马恒达为代表的多家汽车公司, 在努力提升产品质量、安全性和可靠性的同时, 将着力点放在了革新设计流程上。在仿真 App 的帮助下, 马恒达研发团队使产品的设计过程变得更具包容性和灵活性, 推动企业迈向成功。

⇒ 产品设计中的难题

不同团队之间的协作往往是一个非常耗时的过程, 这是因为每个团队都需要以合理、高效的方式整合各自的专业知识。设计工程师在评估新的设计概念或调整现有设计方案时, 其中涉及的复杂物理现象会增加工作的难度。拥有专业知识的仿真工程师能够应对这些极其复杂的问题, 他们可以通过详细的 CAE 分析来帮助设计工程师完成对设计概念的评估。然而多数企业中的仿真工程师人员有限, 在面对大量的技术支持需求时常常无法及时交付评估结果。

特定汽车零部件的设计交付时间取决于所需的迭代次数。设计迭代是确保车辆

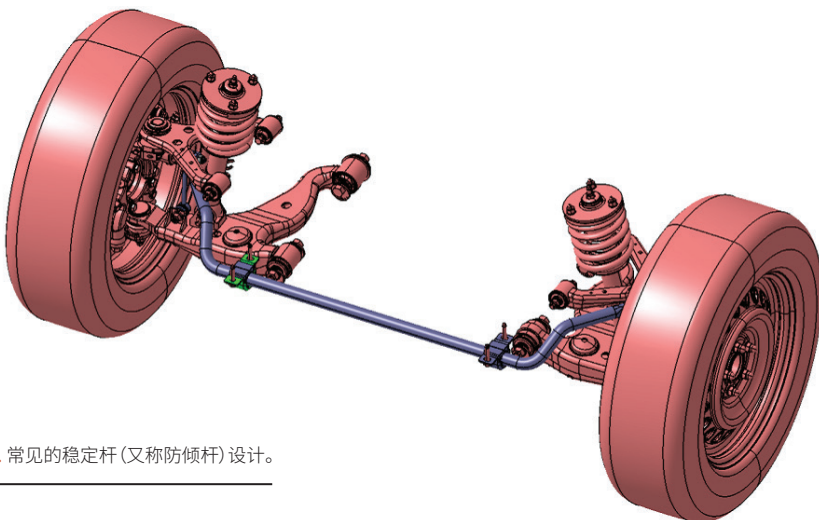


图 1. 常见的稳定杆 (又称防倾杆) 设计。

安全性和可靠性必不可少的重要环节。根据设计方案的复杂度, 仿真分析可能需要数周到数月的时间才能得到可靠结果。此后, 设计团队根据仿真结果执行设计修改, 然后需要再次等待 CAE 团队进行设计的可行性验证。

为了赢得这场与时间的竞赛, 马恒达研发团队借助 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件中的“App 开发器”工具, 开发了多个用于考察各类稳定杆和底盘设计方案的仿真 App。与传统方法相

比, 仿真 App 的使用大幅减少了一款设计在设计团队和仿真团队间的迭代次数。

⇒ 创新的稳定杆设计方法

稳定杆 (图 1) 是汽车悬挂系统中的关键组件, 可防止车辆发生过大的横向侧倾, 它通常被设计成一根包含多个弯曲部分的空心或实心梁。设计团队必须确保稳定杆具有适当的刚度和应力水平, 因此他们需要选择与 CAE 分析师合作, 或是向供应商索取验证报告。CAE 分析师会针对不同的设计创建模型, 以准确模拟稳定杆的形变和应力。一旦模型的验证结果与实验数据良好吻合, 他们就会创建仿真 App。

稳定杆的仿真 App 支持组建各式各样的设计配置, 仅弯曲部分的样式就多达 15 种。不仅如此, 仿真 App 还提供了空心杆和实心杆选项, 如图 2 所示。最终用户

与传统方法相比, 仿真 App 的使用大幅减少了一款设计在设计团队和仿真团队间的迭代次数。

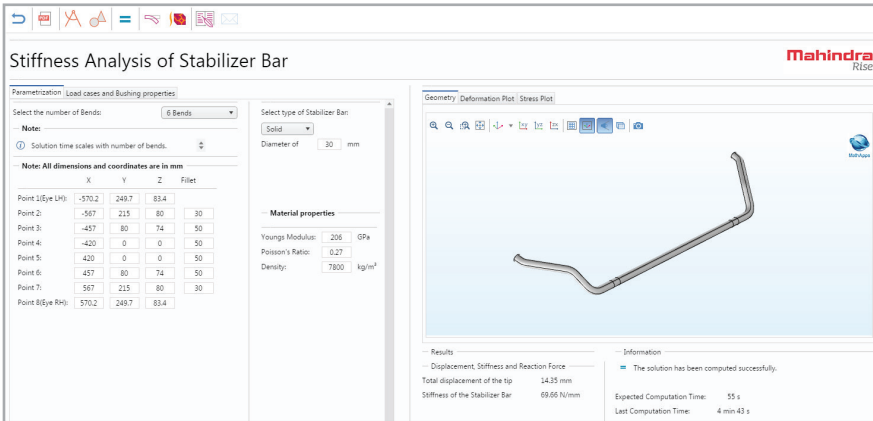


图 2. 仿真 App 可用于创建几何图形以及计算稳定杆的刚度和位移。

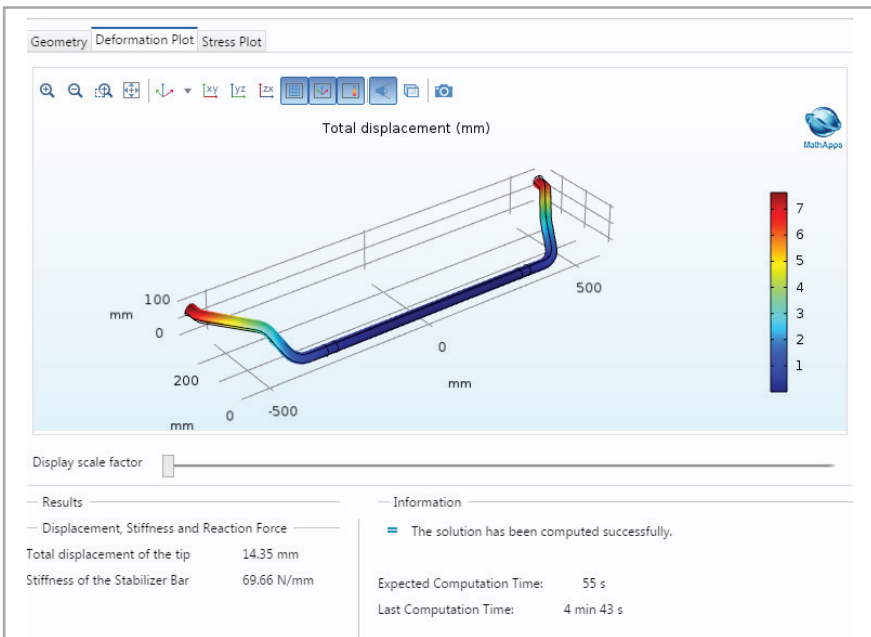


图 3. 使用 App 计算特殊稳定杆配置的刚度得到的仿真结果。

(通常是设计团队的成员)在仿真 App 中输入弯曲处的坐标来表征稳定杆的几何形状,并提供轴承位置、衬套刚度和交叉测试等信息。CAE 分析师通过在仿真 App 中预定义约束条件,方便设计人员简单快捷地运行准确的仿真,计算稳定杆刚度,并建立标准载荷工况的应力模型,如图 3 所示。仿真 App 的一般运行时间只有几分钟,因此设计团队可连续运行迭代,实时获取设计反馈。在了解仿真 App 是基于经过验证的

多物理场模型开发之后,设计团队对汽车封装水平信心大增。马恒达的团队发现,仿真 App 不仅节省了大量时间,更是促进了企业内部协作。新型的团队协作文化也有利于员工对最终产品产生更强烈的主人翁意识,由于他们能在一两天内生成设计方案,减少了对供应商的依赖。

➔ 减少底盘的设计迭代

底盘是一个重要的承载部件,它的作用是为车辆提供结构强度,并充当发动机和变速箱等其他零部件的安装基座。最常见的一种底盘结构是由两条纵向主梁和多个横梁组成的梯形车架(图 4)。横梁的数量、尺寸、位置和形状是早期设计阶段中需要确定的重要参数。

底盘承受的载荷会产生弯曲和扭转载荷,这类问题没有简单的解析解。解决这类问题的常规方法是:参照封装要求,对多款底盘配置进行评估,然后通过多次 CAE 分析完成设计定型。正确的封装意味着所有零部件都能配合运行而不受任何干扰,并且能够正常装配和拆卸。最优设计不仅需要结构牢固,还必需满足装配要求。

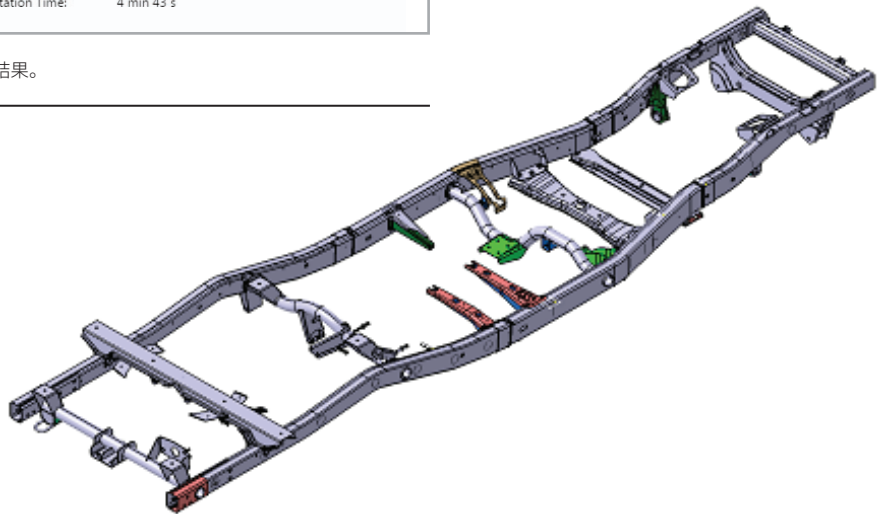


图 4. 基于 CATIA® 软件创建的常见多功能底盘几何结构。

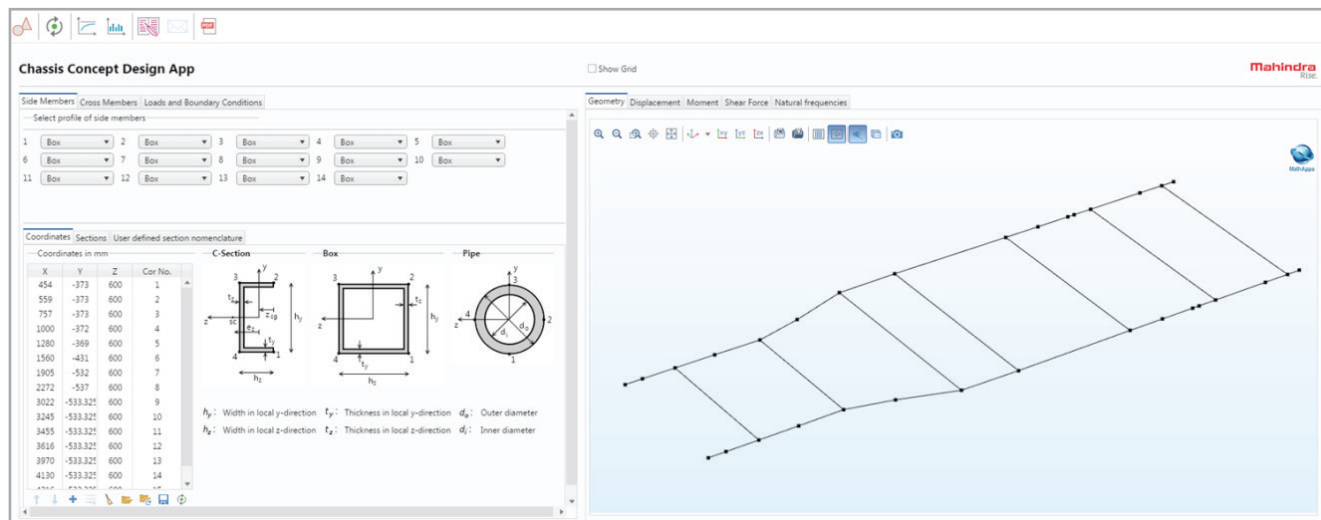


图 5. 马恒达公司内部门户提供的汽车底盘仿真 App (名为 MathApps) 的用户界面。

从封装角度考虑, 每一个完整的 CAE 迭代都需要包含三个独立的分析: 弯曲刚度、扭转刚度和模态。使用这一传统方法必须执行三到四次完整的 CAE 迭代, 而每次迭代往往需要两到三周的时间。

团队借助 COMSOL 多物理场仿真软件将三个独立的分析进行了整合, 从而将完整的 CAE 迭代次数减少至一到两次, 由此节省了宝贵的时间。他们随后又将基于铁木辛柯梁理论 (Timoshenko beam theory) 的一维梁模型 (图 5) 封装为底盘设计仿真 App。最终用户无需了解底层数学模型, 就能从仿真 App 的计算结果中受益。即便是包含大量不同横截面和构件的复杂底盘设计, 仿真也只需短短数秒即可完成。如图 6 所示, 梁分析为各类配置提供了快速而可靠的结果, 并计算了扭转刚度、弯曲刚度和位移。仿真 App 主要服务于负责底盘和稳定杆设计的驱动底盘 (drive away chassis, 简称 DAC) 悬架团队, 支持通过输入简单的文本字段对不同的设计参数进行计算, 无需为每个配置创建 CAD 模型, 这种便捷性节省了 CAE

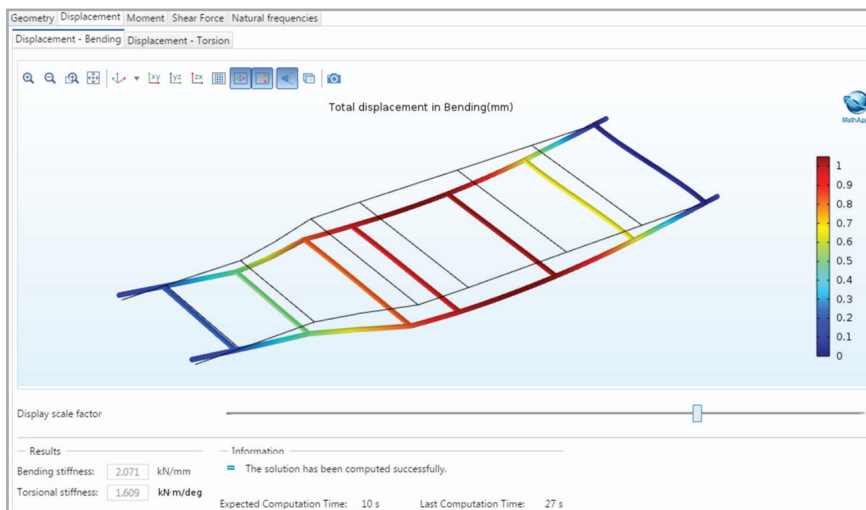


图 6. 底盘设计 App 针对特定配置提供的仿真结果。

分析师和 DAC 悬架团队的宝贵时间。

⇒ 仿真 App 开拓未来设计道路

马恒达开发的仿真 App 具有处理各种参数变化、物理场和边界条件的强大能力。得益于此, 设计人员在产品开发的早期阶段便可以探索各种设计方案, 完全摆脱了对 CAE 分析师的依赖。参数化研究的结果可以对设计进行指导, 从而提升产品性能, 并降低加工成本。

仿真 App 的开发融合了设计人员和 CAE 分析师的意见和反馈, 并通过公司内部安装的 COMSOL Server™ 产品在马恒达的各个团队中进行部署。以前只能由 CAE 分析师经手的复杂设计配置, 现在可以让设计人员在简单易用的平台上随时访问。借助多物理场仿真和 App, 马恒达公司实现了强大的分析能力共享, 他们期望在未来的工作中, 将振动声学 and 热结构分析也纳入仿真分析中。❖

多物理场仿真为风力发电机 免受雷击提供解决方案

美国 NTS 公司的工程师借助多物理场仿真揭开雷电击中风力发电机时的神秘面纱。

作者 **GARY DAGASTINE**

随着全世界不断减少对化石燃料的依赖，全球的风力发电市场迎来蓬勃发展，在未来几年，其年均市场规模预计可达到 700 亿美元。风力发电规模如此之大，可谓是一项伟大的成就；然而，一股强大的力量正在成为该产业发挥全部潜力的障碍：雷电，这是自然界最具破坏性的力量之一。

雷击是引起风力发电机意外停机的最主要原因，它不仅带来数以兆瓦计的电力损耗，还会产生巨大的运行和维护成本。

由于风力发电机拥有巨大的旋转叶片、高耸入云，并且长期暴露的自然环境中，因此特别容易遭受雷击。闪电几乎可以直接或

间接地对风力发电机的所有组件造成严重破坏，包括叶片、控制系统和其他电子元器件。然而，由于后勤条件的限制，不仅维修费用高，对实际的维修操作也提出了巨大考验。



图 1. NTS 运营的高压发生器 (2.4 MV 的马克思发生器)。

NTS 的子公司 Lightning Technologies 是复杂防雷系统设计及验证的全球领导者，主要面向航空航天领域，包括飞机、航天器和发射设备；同时还为风力发电场、工业中心、高尔夫球场、主题公园以及其他高风险场所提供专业服务。

国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, 简称 IEC) 是国际性电工标准化机构，他们制定了叶片的耐雷击水平和防雷击要求；NTS 工程师一直是其分委员会的积极成员。工业标准 IEC 62305 要求风力发电机制造商在叶片制造中加入雷击防护设计。为了提供最有效的保护，工程师必须能够判断当叶片遭受雷击时，其中流过大电流，以及准确的电流流向。但问题是，对雷击电流特性的简单假设得出的结论往往

并不准确。

⇒ 深入剖析雷电流

在美国马萨诸塞州皮茨菲尔德，一栋约 1672 平方米的建筑设施中，NTS 运营着世界上功能最齐全的雷电模拟实验室之一，高约 4.3 米和 7.6 米的闪电发生器伫立其中，可产生高达 2.4 MV 的电压 (图 1)。

几十年来，NTS 一直致力于风力发电机叶片保护系统的设计和研发。由于风力发电机叶片为翼型，该公司可以将航空航天应用方面的深厚知识基础直接应用到这一领域。

NTS 皮茨菲尔德分公司模拟分析团队的负责人 Justin McKennon 表示，传统的风力发电机是通过添加表面保护层 (surface protection layer, 简称 SPL) 覆盖采用轻质、高强度碳纤维复合材料制成的

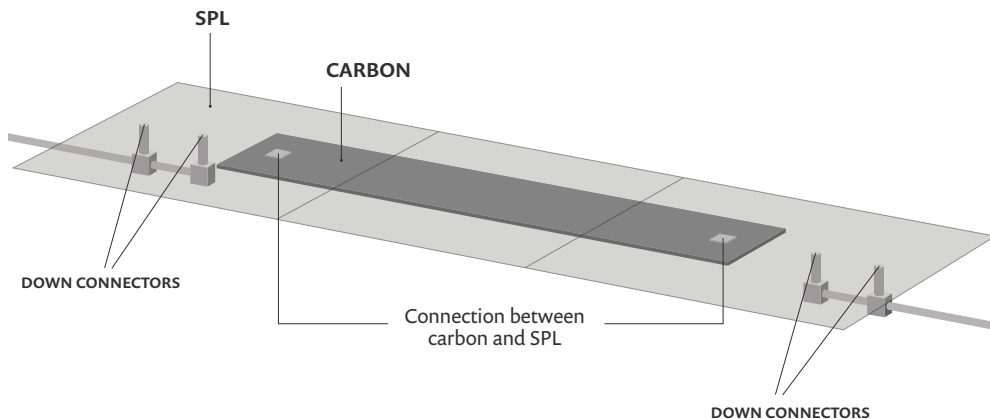


图 2. 碳堆叠层上方覆盖的薄型铝表面保护层 (SPL) 的几何结构。图注: SPL - 表面保护层; CARBON - 碳层; DOWN CONNECTORS - 引下线连接; Connection between carbon and SPL - 碳层与 SPL 之间的电连接

叶片, 以此实施保护措施。SPL 一般由导电网构成, 可将叶片上雷电“附着”(雷击)点的电流安全引至地面。

“很多叶片结构都包含与表面保护层平行排列的碳纤维结构层, 它们叠加起来形成碳层, 并沿叶片长度在碳堆叠层和 SPL 之间建立了周期性电连接。这样做是为了防止在两者之间产生过高的电压差, 因为一旦出现高压差, 就可能产生电弧, 进而损坏叶片。电连接虽然可以降低电压差, 但也会使电流流入碳纤维复合材料, 这无形中增加了叶片的设计难度。” McKennon 解释说。

确定碳堆叠层对不同电流的负载能力, 预测可能出现的雷电附着点和击穿的可能性等因素, 这些并不是无关紧要的小问题。McKennon 解释说, 叶片物理测试的成本(有些叶片长达 70 米甚至更长)十分昂贵, 对雷电效应进行数值模拟已经成为设计过程中的一个关键环节。

McKennon 表示: “由于雷电现象涉及的物理场非常复杂, 工程师很容易做出不恰当的假设, 从而在很大程度上影响模型的准确性。”

⇒ 仿真减少过度设计

人们常常容易做出这样一个错误假设: 碳堆叠层的电导率在各个方向都是相同的。而实际上, 碳纤维的电导率在不同方向上可能截然不同。

在图 2 显示的几何结构中, 碳堆叠层上方 5 mm 处覆盖了由铝片制成的 SPL 导电网, 其厚度约为 500 μm , 电导率根据实验测量值进行设置; 碳纤维的电导率同样采用了实验值。工程师在 COMSOL 模型中同时分析了理想各向同性特性和实际各向异性

特性两种情况。

工程师使用 IEC 标准电流波形的解析表达式, 将电流注入 SPL 的一端, 电流会通过铜

质引线从另一端流出。SPL 与碳层之间的所有电连接均由铜材料制成。

在研究设计和模拟电磁脉冲传播的过程中, McKennon 使用 COMSOL 软件求解了磁矢势的时域波动方程。他根据仿真结果确定了雷电附着点处的相关电流、电场和其他数据值, 从而深入分析了整个结构中电流的总体特性。

各向同性假设低估了流经 SPL 的电流量, 据此得出的结论是: 碳层中流过的电流更多, 而 SPL 中的电流更少(图 3)。碳层由许多独立的纤维层组

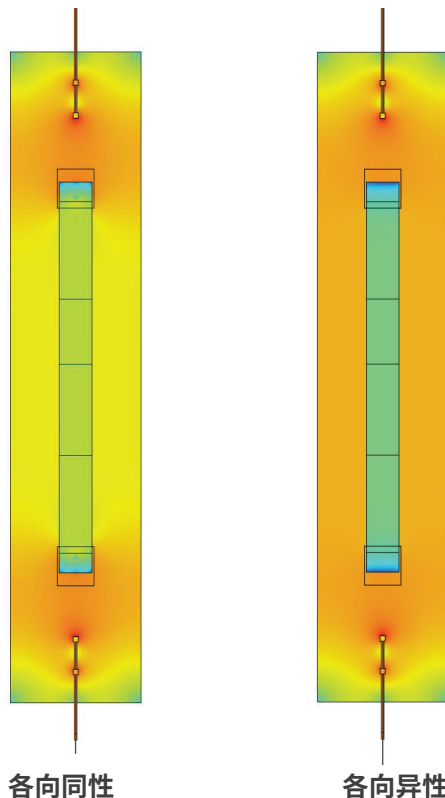


图 3. 仿真结果显示, SPL 在各向同性理想情况下的电流量明显小于各向异性实际情况的电流量。

成。纤维层内沿纤维方向具有极强的导电性，但要使电流在其中流入和流出，却是一项极具挑战的工作。如果碳层与其他物质的界面通过大电流，则许多独立的碳纤维会因为过热和/或电弧而烧毁（图 4）。由于碳层承受着主要的结构载荷，这种损坏会大幅缩短叶片的使用寿命，严重时甚至会导致叶片出现灾难性故障。这就是为什么工程师一直希望尽力避免碳层中存在过多电流的原因。

各向同性假设严重高估了碳层中的电流密度，这是因为它忽略了碳纤维中的电阻实际上具有很强的方向性（图 5）。如果忽略这种特性，仅考虑碳层在体积和长度上的优势，碳层似乎比 SPL 更适合作为电流路径，然而这与事实完全不符。这种错误的高估很可能使工程师面临一些其实根本不存在的问题，延缓开发进程，造成产品过度设计。

McKennon 总结道：“在模拟复杂的物理场时，你必须明确哪些是关键因素，哪些是干扰项，然后循序渐进地逐步建立模型，才能避免引入错误或采用不恰当的假设，确保仿真结果的准确性和可靠性。”

⇒ 根据精确结果做出明智的商业决策

“现在，我们已经具备了快速建立并优化仿真模型的能力，这不仅帮助我们大大降低了项目风险，还让按需应变地获取工程级数据变成了现实。” McKennon 评论道，“我们无需花费大量时间和资金来制作复杂的测试样品，而是使用 COMSOL 模拟各种物理现象，这明显缩小了项目中潜在问题涉及的范围。在很多情况下，我们无法使用实物样品测得关键数据，此时就需要利用数值仿真分析来弥补这些不足。”

“时间就是金钱，在我们行业尤其如此。借助软件提供的强大功能，我们能够为客户提供优质高效的服务。事实上，一些客户对仿真的有效性充满信心，他们甚至会完全依赖我们的仿真结果来制定大批量生产的业务决策，很少再进行实验验证。面对如此的利害关系和客户的高度信任，我们不允许自己犯错，也无法承担任何错误造成的后果。COMSOL 作为一款建模仿真工具，为我们带来了无穷的价值。我们也相信，COMSOL 模型能够准确地反映真实世界。” ❖

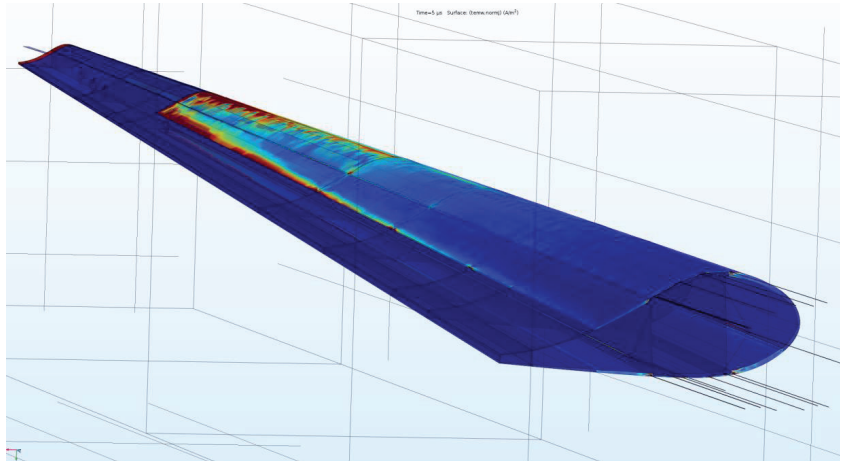


图 4. 仿真结果显示了由碳纤维复合材料制成的风力发电机叶片样品中的电流密度。

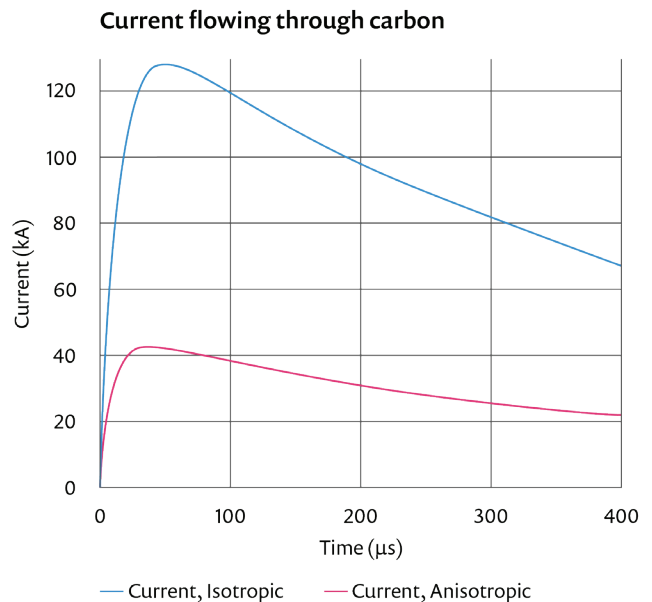


图 5. 绘图显示了各向同性和各向异性碳纤维中的电流水平。



Justin McKennon,
NTS 建模分析团队
负责人。



1100 kV 气体绝缘金属封闭开关。图片由平高集团提供。

大型电气设备性能的仿真优化

平高集团使用 COMSOL 多物理场仿真软件提高了大型电气设备的研发效率, 并大幅减少了产品的研发成本, 并通过仿真 App 为企业内跨部门的合作提供了极大的便利。

作者 **YUHANG QIN**

随着社会对电力能源需求的增加, 电力电网规模越来越大, 需要更多的电气设备投入电网。变电站是电力系统重要的组成部分, 与人们日常生活息息相关, 其主要作用是对电压进行变换, 以及接受和分配电能。为了减少电能传输线路上的损耗, 发电厂产生的电能长距离传输前需要在变电站将电压升高; 而为了确保用户的用电安全, 电能又需要在供给用户前在变电站内将电压降低。

常规的变电站中包含了大量的电气设备, 这些设备按照功能的不同被设置在多个配电室中。由于使用空气作为绝缘介质, 为了满足绝缘需求, 不同的设备间需要保持一定的安全间距, 这导致变电站的整体占地面积非常大。此外, 由于变电站中的许多配件暴露在自然环境中, 从而增加了变电站的维护工作。气体绝缘金属封闭开

关(Gas Insulated metal and enclosed Switchgear, 简称 GIS)是一种新型的高压配电装置, 通过优化设计以及使用特殊的绝缘气体, 可以将变电站中除变压器以外的各类设备合理、紧凑地组合成一个整体。相比于常规的变电站, GIS 具备结构紧凑、占地面积小、可靠性高、安全性强、维护工作量小等优点, 近年来获得了广泛的应用。

虽然 GIS 的可靠性高于传统变电站, 然而在长期的运行过程中, 会因绝缘子、绝缘操作杆等固体绝缘介质表面积聚的电荷导致绝缘失效, 造成严重的安全事故。GIS 的全封闭结构还会导致故障的定位和检修都十分困难。为了提升 GIS 组件的安全性、减少故障, 使 GIS 能够更稳定地运行, 平高集团有限公司开展了大量的研究工作, 致力于开发出高效、稳定的 GIS 设备。平高集团有限公司是国家电网公司直属单位, 是

中国电工行业重大技术装备支柱企业。

⇒ GIS 绝缘失效的仿真分析

相比于传统的变电站, GIS 在体积和集成度方面的优势得益于设备中不同组件之间良好的绝缘性。GIS 中的全部电气组件都被封闭在接地的金属壳体内, 并充入了合成惰性气体六氟化硫(SF_6)进行绝缘。由于 SF_6 的绝缘性能和灭弧性能都远高于空气, 所以 GIS 内组件间的距离可以大幅减小, 因此其体积可以远小于传统变电站。GIS 在长期运行过程中, 电荷会在 GIS 内部绝缘气体和固体绝缘介质的交界面聚集。当聚集的电荷达到一定的数量后, 过高的电压差会导致固体绝缘介质周围的气体被击穿, 并沿固体绝缘子表面放电。局部放电后, 被电离的绝缘气体以及金属部件等会产生分解物, 从而导致绝缘失效。

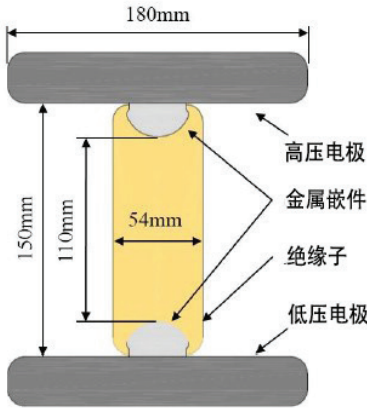


图 1. 左: GIS 绝缘系统组件截面几何结构示意图; 右: 施加 100 kV 高压后绝缘子及其周围的直流电场分布图。

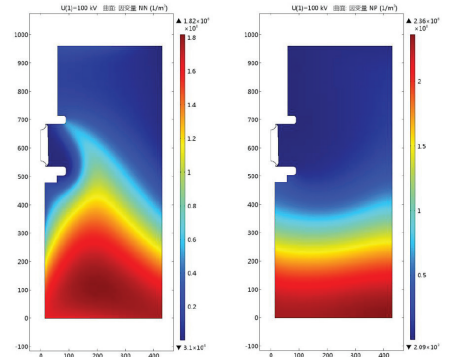
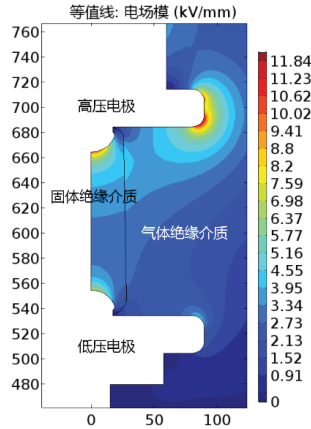


图 2. GIS 绝缘系统组件截面上的负离子(左)和正离子(右)的分布情况。

绝缘失效是 GIS 设备中的常见故障, 严重制约了其在工程方面的应用。绝缘失效是一个复杂的物理问题, 涉及了电场、温度场、结构等多个物理现象间的相互耦合。如果用实验来分析该问题, 实验设计和测试都具有较大难度。此外, GIS 设备造价昂贵, 导致每一次实验测试需要花费大量费用。平高集团的张博工程师表示, “仅以 1100kV 套管的测试为例, 减少一次套管试验, 可以节省加工及测试费用约 1000 万元。” 为减少研发成本, 同时提高研发效率, 平高集团开始使用 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件对 GIS 设备的绝缘问题进行分析。

平高集团的工程师在 COMSOL 多物理场仿真软件中创建了适用于直流 GIS 气固绝缘电场分布和表面电荷积累计算的数值模型。如图 1 的左图所示, 模型由高压电极、低压电极、绝缘子和金属嵌件组成, 这些组件放置在绝对压力为 0.4 MPa 的 SF₆ 气体中, 通过将 100 kV 高压电源加载至高压电极形成直流电场。研究团队对电场分布情况进行了模拟, 图 1 的右图显示了加载电压后气固绝缘介质中的电场分布。

对于固体绝缘介质来说, 电荷密度取

决于材料介电常数和电导率。在气体区域, 由于气体中正负离子在电场作用下的漂移以及浓度梯度造成的扩散, 其电导率呈高度非线性。由于气固介质界面存在电导率及介电常数的不连续情况, 电荷必然在边界积聚, 从而畸变了原有的电场, 减弱了直流电场下绝缘子的绝缘性能。

随后, 工程师对绝缘体中的正负离子的浓度分布进行了模拟(图 2), 得到了气体区域内不同区间的粒子浓度分布, 以及气体电导率的非均匀空间分布, 为提升系统绝缘效果提供了有力支持。

根据电导率仿真结果, 工程师获得了表面电位和表面电荷随加压时间的变化(图 3)。可以看出随时间推移, 电荷积聚增

多, 在 10⁷ 秒(约 3000 小时)后达到稳定。

工程师根据上述仿真结果, 进一步研究气体离子对产生率、固体绝缘介质体积和表面电导率对表面电荷极性和分布的影响规律。该研究将有助于通过减小关键区域电场和最小化局部表面电荷累积来改善 GIS 的绝缘设计, 优化绝缘子的几何形状和材料特性, 以及相关的验证设计变更。

➔ 仿真助力 GIS 设备的优化

温度控制是 GIS 优化工作中另一个需要重点关注的问题。GIS 设备在运行过程中, 由于电流通过母线时会产生大量的焦耳热, 造成内部温度升高, 进而可能引起内

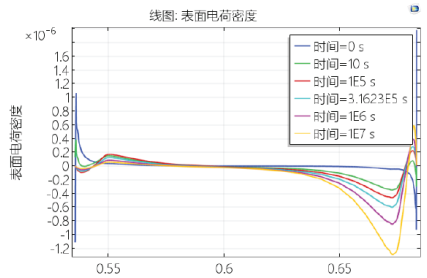
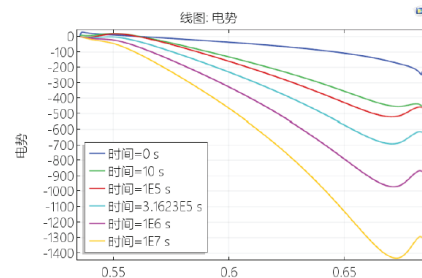


图 3. 绝缘子表面电位(左)和电荷密度(右)随时间的变化。

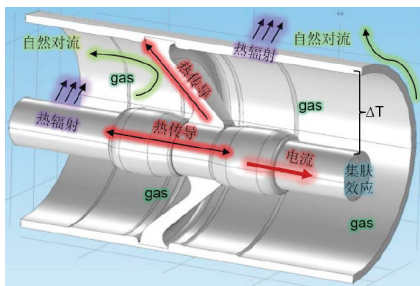


图 4. GIS 中母线传热仿真模型结构示意图。

图注: gas - 气体

部各类组件的过热故障。针对母线温升及散热性能的优化是提升 GIS 设备性能的有效手段。

平高集团的研发团队在 COMSOL 软件中建立了模型,用于研究 GIS 中母线的温度变化(如图 4 所示)。仿真模型中考虑了传导、对流和辐射三种散热模式,可以根据设备中的电阻热以及设备的散热情况,计算出设备在稳态运行时的内部温度分布。

温升仿真结果可以帮助产品研发人员在 GIS 设计阶段实现准确预估产品在运行过程中的温升状况,进而优化材料类型、产品尺寸、结构布局等多项参数,避免 GIS 设备因温升问题造成的各类过热故障。

⇒ 让整个企业受益于仿真分析的强大力量

平高集团的 GIS 产品设计人员在研发过程中经常需要调整设计参数,因此会求助于团队内的仿真工程师。即便是一个常用参数的调整,仿真工程师也需要针对每一个需求调整底层模型的设置,这造成了大量的重复工作,时常导致仿真分析结果的延误。

为了提升仿真分析的效率,平高集团的工程师使用 COMSOL 软件中的 App 开发功能,将 GIS 温升模型封装成了仿真

App。所有设计人员都可以利用图 5 所示的仿真 App 方便地计算不同参数带来的功率和温度变化,并使用分析结果对产品进行优化。现在,平高集团的产品设计人员、工程设计人员和运维服务人员都可以借助简单易用的仿真 App 进行 GIS 的开发和维护工作,为企业内跨部门的合作提供了极大的便利。张博表示:“仿真 App 的出现,

极大地促进了经验的传承和知识的分享,现在整个企业都可以受益于仿真分析带来的优势。”

目前,平高集团正在开展基于云计算的高压开关仿真 App 开发研究。平高集团的仿真团队希望能够通过更加深入地开展高压开关多物理场仿真研究,帮助产品设计人员研发出性能更优的 GIS 产品。❖

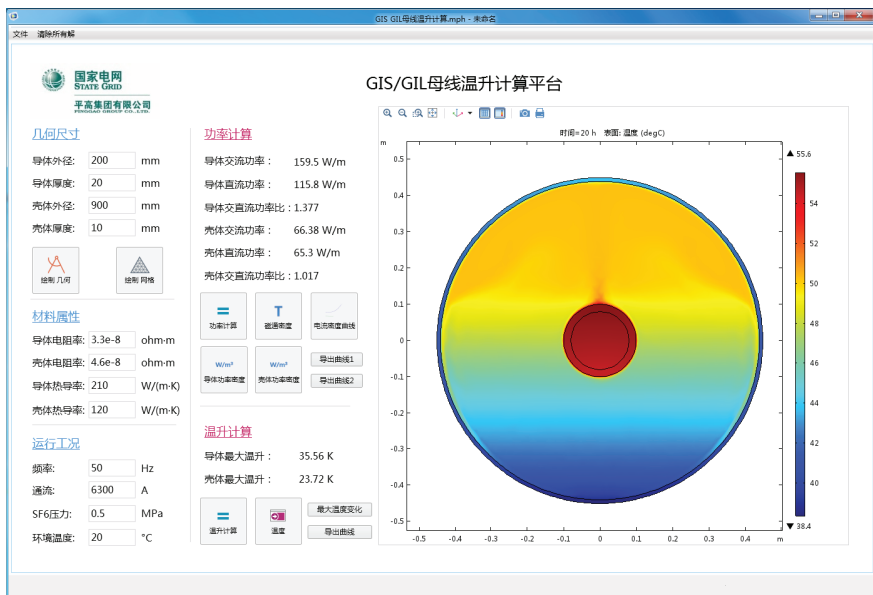
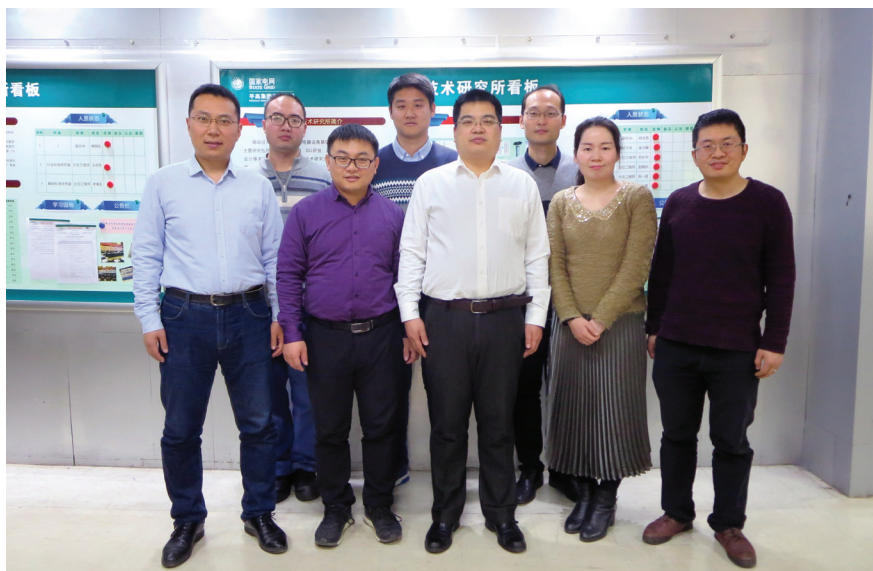


图 5. GIS 温升仿真 App。



平高集团技术中心的仿真团队,从左到右依次为:张豪、王刚、王之军、刘亚培、郭煜敬、张博、郝郝羽、姚永其

仿真 App 推动教育革新, 培养 STEM 人才

作者 **IVANA MILANOVIC**, 哈特福德大学

曾经, 教学是一件相对简单的工作——粉笔、黑板、练习题和课后作业几乎就是全部内容。不论我们使用的是铅笔、计算尺还是计算器, 教学形式几十年来几乎一成不变。学校的本科工程课程体系开设选修课程和研究生级别课程, 引导学生探讨工程领域的热门话题, 掌握最前沿的必备技能。授课方式以教授讲课(包括通过问答的形式展开课堂讨论)为主, 并辅以大量的推理论证。

如今, 我们希望能够优化学生的学习过程, 提高学生的学习能力, 强化学习效果, 为社会培养具有创新能力的复合型人才。为此, 我们不断探索各种教学模式, 例如, 基于问题的学习、基于项目的学习以及探究性学习(IBL), 等等。然而, 探究性学习往往需要教学双方在课堂内外都投入大量的时间。

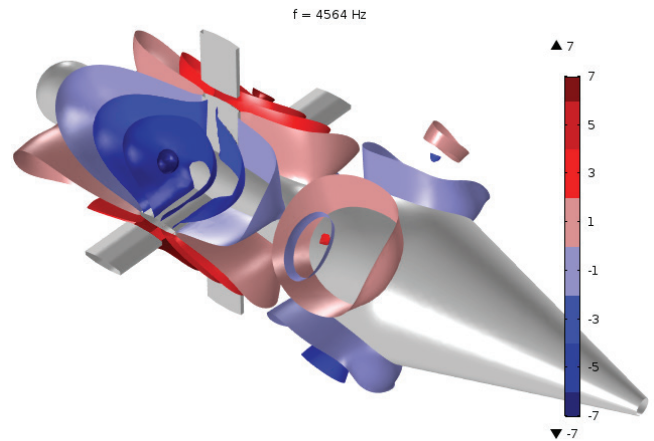
问题在于, 在教材覆盖面本身就比较广的情况下, 以讲授为主的课堂如何留出时间来引导学生进行探究性学习? 我们如何才能在本科教学中提升科学、技术、工程、数学(STEM)教育的质量?

针对上述问题, 我们制定了相应的对策: 通过使用 COMSOL Multiphysics® 软件, 将基于问题的学习、探究性学习、数值仿真和仿真 App 有机地结合在一起, 重点在于可靠的参考资料和有效的教师指导支撑的课外学习。我们不再一味地以传统方式传授课本知识, 而是以让学生具备成功者所共有的特质为培养目标。新的教学模式激发了学生的学习兴趣, 他们表现出极大的热情, 取得了更优异的学术表现。

在美国哈特福德大学(University of Hartford), 我们在大学三年级相继开设的两门课程(流体力学和传热学)中加入了基于仿真的设计和探究性学习活动。这两门课程都进行了整改: 增加了框架式教学模式(通过构建一种概念框架, 逐步引导学生发现和解决问题, 从而掌握所要学习的知识)并引入了情景仿真, 通过开发仿真 App 来培养学生的建模技术能力。学生能够在解决实际技术问题的过程中透彻理解热流体概念, 并在每次运行仿真后编写技术报告, 以此提升写作技巧。在仿真 App 的开发过程中, 他们需要创建简洁的用户界面, 使最终用户既能使用底层模型的全部功能, 又不会受困于其背后的复杂性。为了配合新的教学模式, 我们决定不再对作业进行分级加权评分, 而是引导学生通过课堂讨论和自学

来掌握理论知识、提高分析问题的能力, 每个学期通过主修课程考试来评估学生的学习效果。

鉴于计算流体力学(CFD)课程存在认证要求和经费限制, 本科工程课程体系通常不开设这类课程。然而经验告诉我们, 数学建模、数值仿真和可视化技术的完美融合不仅有效改进了学生的课堂表现, 对激发学生的个人成长、提高学生的综合素养也有着深远的影响。



典型的喷气发动机多流道喷嘴的压力等值面。图片源于由哈特福德大学的 Ivana Milanovic 教授、NASA 格伦研究中心的 Khairul Zaman 和 Christopher Miller 撰写的 Resonance & Tones in Multi-Stream Nozzle Flows 一文, 收录于 NASA 2017 年报告。本科在校大学生 Iliana Albion-Poles 和 Jeffrey Severino 在康涅狄格州太空研究资助计划(Connecticut Space Grant for Faculty Research)的支持下, 正在继续推进这项研究。



作者简介

Ivana Milanovic 是哈特福德大学机械工程系教授, 参与编写的期刊论文、NASA 报告、学术会议论文和软件发布相关文章多达 90 余篇, 是康涅狄格州科学与工程学院(这是一个由科研人员和工程师组成的团体, 专门为州立机构和州立机构提供支持和专业见解)的一名成员。Milanovic 博士在纽约大学坦登工程学院获得机械工程专业博士学位, 在塞尔维亚贝尔格莱德大学获得理学学士和硕士学位。