

多物理场仿真帮助 Miele 优化电磁炉设计

十年前，如果您问一个主厨他喜欢哪种类型的炉灶，毫无疑问他会回答燃气灶。但是现在，Miele 为专业厨师和家庭烹饪提供了另一种更好的选择：电磁炉。

作者：ALEXANDRA FOLEY

电磁炉因为其高效率而众所周知，其所用电能中超过 90% 会直接用于加热正在烹饪的食物。与燃气灶或电炉相比，这是一个巨大的提升，后两者的效率仅为 50%。如果电磁炉可以为厨师提供比传统炉灶更好的精度和速度，同时仍然保持最佳的效率，那么这类灶具将是烹饪器具行业的重大突破。

Miele 是家用电器和商用机器领域全球

领先企业，制造这种电磁炉正是它的专长。

mieletec FH Bielefeld 是 Miele & Cie. KG 与德国比勒费尔德应用科学大学联合成立的一个研究实验室，其研究人员使用了仿真和多物理场方法来改进、验证和优化其电磁炉设计。

利用多物理场耦合仿真，mieletec 联合创始人兼科学执行官 Christian Schröder 设计了践行 Miele 座右铭“immer besser”的

优化电磁炉。Immer besser 从德文翻译过来的意思是“没有最好，只有更好”，它推动着该公司创造出经久不衰的伟大实用设计。“我们对于 mieletec 所开发的产品感到非常满意”，mieletec 联合创始人兼科学主管、Miele 创新开发主任 Holger Ernst 说，“mieletec 能够创造比燃气灶更精确，同时仍提供更高能效的电磁炉。”

心急水不沸——除非使用电磁炉

不管是谁发明了这句话，他大概从未用过电磁炉。燃气灶或电炉可能需要十到十五分钟才能烧开一锅水，与它们不同，电磁炉可以在短短几分钟内使一锅冷水沸腾。这是由一种与传统炉灶完全不同的加热技术实现的：感应加热。

电磁炉可以加热放在炉灶上方的锅具。虽然这看起来与燃气灶或电炉的工作方式类似，但它实际上是一个完全不同的过程。电磁炉加热的是金属锅具，而不是炉面（见图 1）。“加热不是在炉灶中发生的，”Schröder 描述道，“加热实际上是发生在锅具自身内部，这使炉灶摸上去感觉很凉。”传统炉灶加热的是炉灶表面，然后通过传导加热上方的锅具。

电磁炉的工作原理基于感应加热效应。首先，一个锅具放在位于炉面下的铜线圈上。当交流电流 (AC) 通过铜线圈时，它会产生一个磁场，该磁场会在锅具的金属内部感应产生电流。这些感应电流（称为涡流）通过焦耳热效应加热锅具。然后，锅具内的物质先通过传导加热，之后再通过对流加热。



图 1：炉面一直保持低温；实际情况是，虽然锅内的水在沸腾，炉面上的冰块却几乎不融化。

最初，电磁炉使用试错过程进行设计，研究人员依赖他们的经验来初步估算所需的频率、线圈大小和功率输出。然后不断修改结果，直到获得最佳性能，成为最终的设计。但是，这一过程成本高昂且耗时，并且不会为工程师留下足够的信息来了解系统中发生的情况，以及该过程是否真正进行了优化。

“仿真可以使你获得永远无法从实验中获取的数据”，Schröder 说，“通过仿真，可以更好地了解线圈或锅具内部发生的变化，从而知道哪些方面需要优化。”

通过使用 COMSOL Multiphysics 和来自 Miele 的 CAD 几何模型，Schröder 及其来自 mieletec 的研究团队找到了炉灶设计的一组最优状态。“实际上，我们能够仿真整个系统，这使我们能够改进炉灶的能效”，Schröder 说。COMSOL Multiphysics 的仿真精度使他们可以在其中内优化他们的设计，这样，当第一批原型制造出来时，他们已经清楚地知道性能如何。

设计面临的挑战 —— 锅具在炉灶上发出噪音和移动

线圈感应产生的磁场会为设计带来一些有趣的挑战。“我们面临的最大问题之一是在涡流流过锅具时锅子发出的噪声”，Schröder 说，“这种电流会产生非常难以消除的尖锐噪声。消除噪音的唯一途径是调节交流电流的频率和线圈的几何形状，从而使噪声的音频高于人耳的听觉范围。”

例如，在德国，家用电源插座输出的电源标准值为 220 V 和 50 Hz。利用 AC/AC 转换器，可以升高线圈中电流的频率，直到听不到锅具产生的噪声为止。“使用仿真，我们找到了产生噪音最小的电流频率和线圈设计方案”，Schröder 说。通过将频率升高到 30 kHz 并优化线圈，mieletec 设计出了对于人耳近乎静音的电磁炉。为什么说是近乎静音呢？因为，即使工作频率不在听觉范围内，仍然会存在其他噪音（例如磁致伸缩，见图 2），产生能够听到的低频噪音。

感应加热过程通过 COMSOL Multiphysics

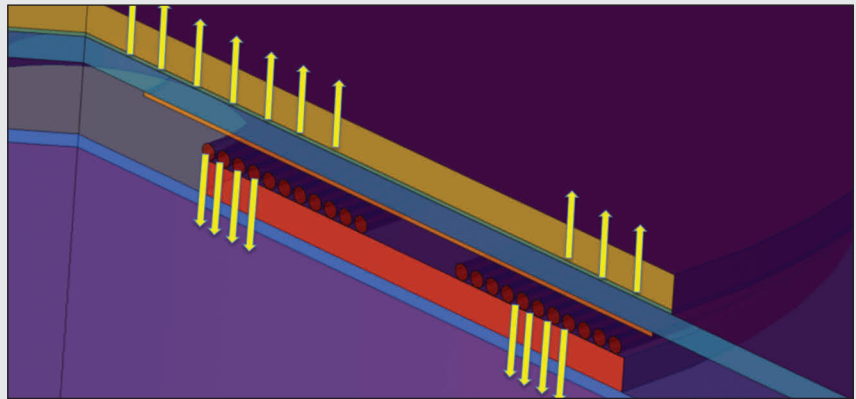


图 2：模型几何包含电磁炉和锅具。需要考虑的几种材料（从下到上）：铝（蓝色）、铁氧体（红色）、铜线圈的绕组（棕色）、云母（橙色）、玻璃陶瓷（天蓝色）、金属锅（绿色和深黄色）。此外，还显示了作用于电磁炉—锅具系统的洛伦兹力分布（淡黄色箭头）。

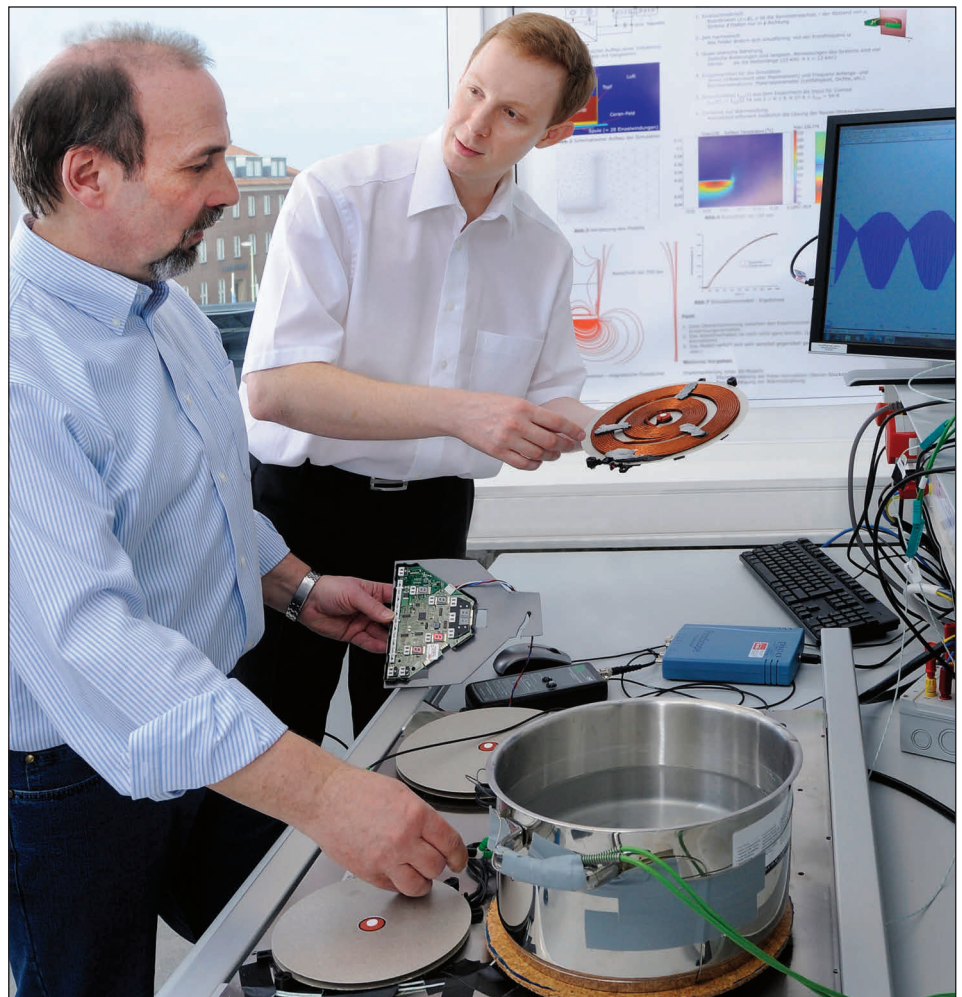


图 3：科研人员 Werner Klose（左）和 Mikhail Tolstykh（右）在进行样品测试。由于炉面已被移除，您可以看到炉灶的内部构造。

的 AC/DC 模块和传热模块进行仿真。为了准确了解炉灶和锅具中发生的情况，我们同时分析了电磁感应产生的热量分布，并优化确定

由于系统电磁力的影响，还会遇到另一个问题。感应炊具是由顺磁金属制成的，它与磁场之间会产生相互作用的电磁力，可能会导致

互相抵消，由此产生的净力将导致锅具在炉灶上移动。

“我们需要知道制造线圈的尺寸、形状和使用的材料”，Schröder 说，“这都属于材料科学。”通过仿真，Schröder 及其团队（见图 3）能够了解不同材料属性如何影响他们对于热性能和电磁性能的设计。这使他们能够设计出确保锅具保持原地不动的线圈，同时仍能提供适当功率来进行烹饪。

“我们必须处理同时包含有多孔介质流和自然对流传热的仿真，这是一个真正的多物理场应用”

最佳运行条件。“目前，这是每家制造商都要面临的问题”，Schröder 继续道，“不过在将来，我们可以制造出真正无声的电磁炉。”

放在炉面上的锅具四处移动。发生这种情况是因为锅具上的涡电流会产生磁场，该磁场会与线圈产生的磁场相互作用。如果这些磁场力未

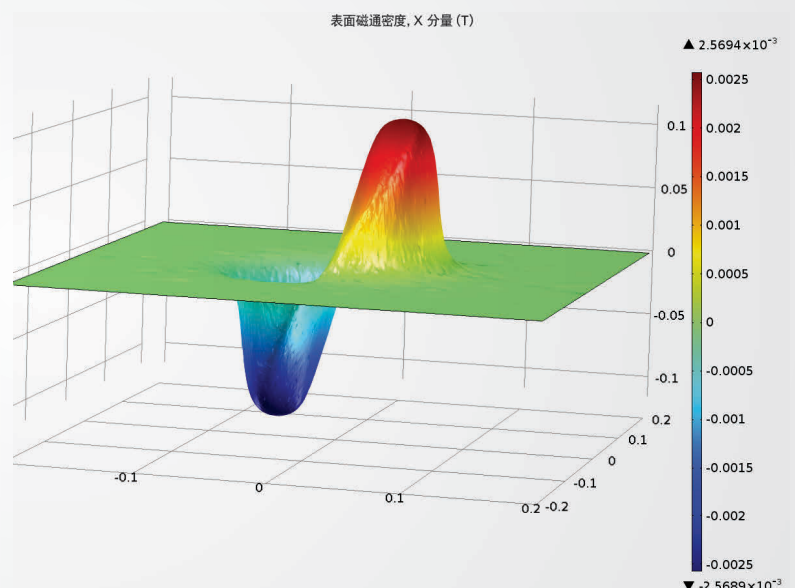
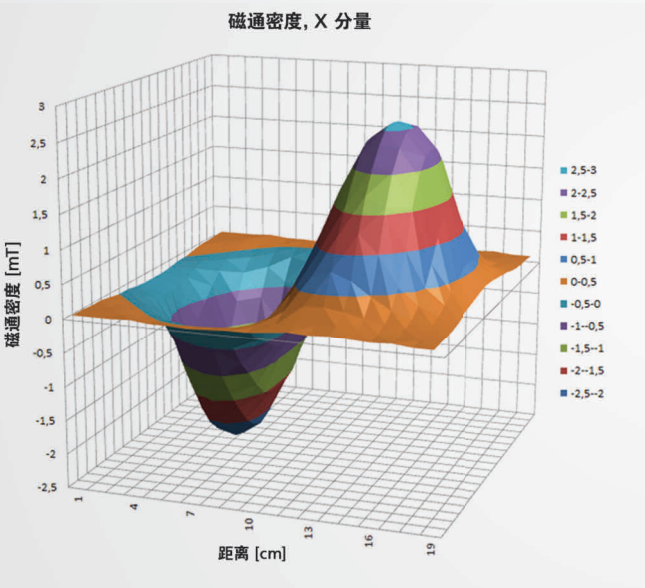


图 4：某条件下线圈产生的磁通密度 x 分量。测量（左）和仿真（右）结果高度一致。



Mieletec FH Bielefeld 的科学委员会委员在最新设计的烤炉前。从左到右：Christian Schröder、Sonja Schöning 和 Holger Ernst。

仿真与原型比较

在测试他们的原型时，mieletec 对于他们发现的结果印象深刻。“真是令人惊叹”，Schröder 说，“我们发现仿真预测的结果与对原型进行的测量所显示的结果极其一致，其他软件很少会发生这种情况。”在图 4 和图 5 中可以看到这些结果的示例。

由于他们的仿真精确地描述了原型的性能，因此 mieletec 能够节省大量的开发时间，将完成他们的设计所需的实验数量减少了 80%。

为了测试其电磁炉是否能均匀地加热食物，mieletec 使用煎饼来评估平底锅表面的热分布。“如果标准煎饼的一些地方烧焦，而其他一些地方没烤熟，则说明炉灶的加热效果不够好”，Schröder 描述道，“您会希望煎饼颜色自然，并被均匀地烤熟。在德国广泛认可的日用消费品权威机构德国商品检测基金会（Stiftung Warentest, www.test.de）将 Miele 炉灶评级为能效最高，更重要的是，能够煎出好吃又好看的焦黄煎饼。”

传统器具仿真

Mieletec 也在研究其他厨房器具，例如对流烤炉。在该应用中，全面了解材料和所发生

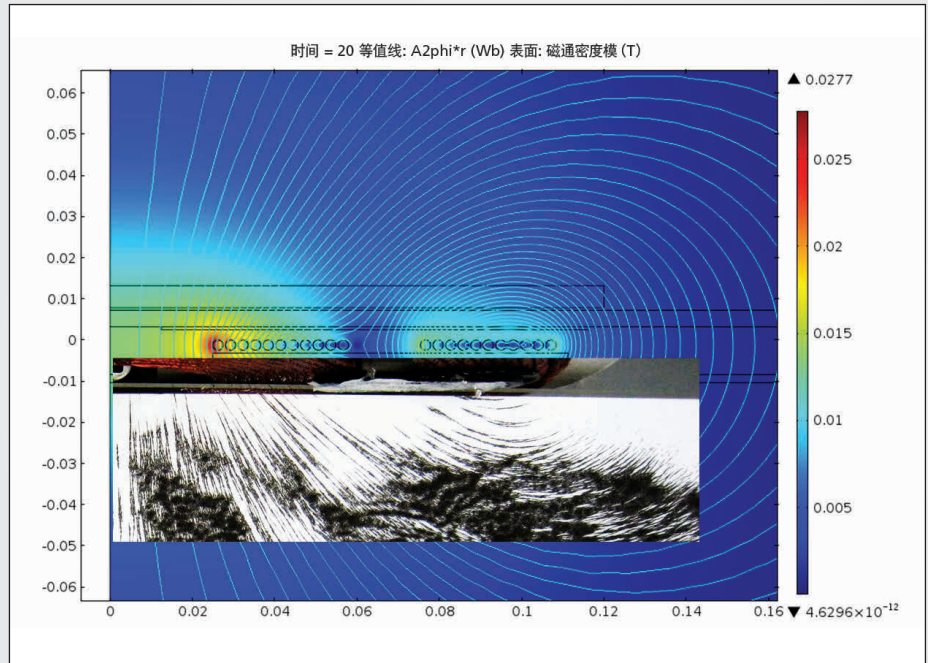


图 5：COMSOL Multiphysics 模拟结果（磁通密度模）和实验得到的磁场线之间的比较显示了仿真非常精确，可以用于在设计原型之前测试其他线圈。

的多物理场相互作用在开发优化烤炉时同样也非常重要。为了验证优化设计，他们执行了一

更高能效和更好烹调体验方面受益的设计。下一步要做的是，通过对复杂的多物理场效应（例

“在实际中需要持续几天的测试在仿真时只需几个小时就可以完成”

项测试，在烤炉内放入了一块水饱和的多孔石头。在几天中，这块石头通过各种加热循环，以评估烤炉的加热速率和能效。

我们必须同时分析涉及到多孔介质流的自然对流传热仿真，这是一个真正的多物理场应用”，Schröder 评论道，“该仿真使我们可以实际中，在实际传感器无法进入的一些位置点测量石头的温度。仿真使我们可以更深入地了解设计”，他继续道，“在实际中需要持续几天的测试在仿真时只需几个小时就可以完成。这可以节约宝贵的时间和资源。更不用说，我们的对流烤炉达到了最高的能效等级。”

家用电器的未来

借助于仿真，mieletec 提供了消费者已在

如磁致伸缩和材料老化）的分析，更深入地认识整个感应加热系统。此外，mieletec 正在研究下一代电磁炉（称为多线圈电磁炉），它将允许消费者将炊具放在在炉面上的任意位置，而不是预置的范围内。炉灶将能够自动感应锅子所处的位置，并自动开启某一组线圈来作出相应的调整，实现最佳的烹饪条件。

烹饪器具中的这些热门新设计给烹饪行业带来了新的革命，让家庭和专业厨师可以获得更安全 and 更节能的炉具。Ernst 总结道，“我们期待看到 mieletec 使用 COMSOL Multiphysics 来推进设计过程，提供更为尖端的技术”。