

# 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。

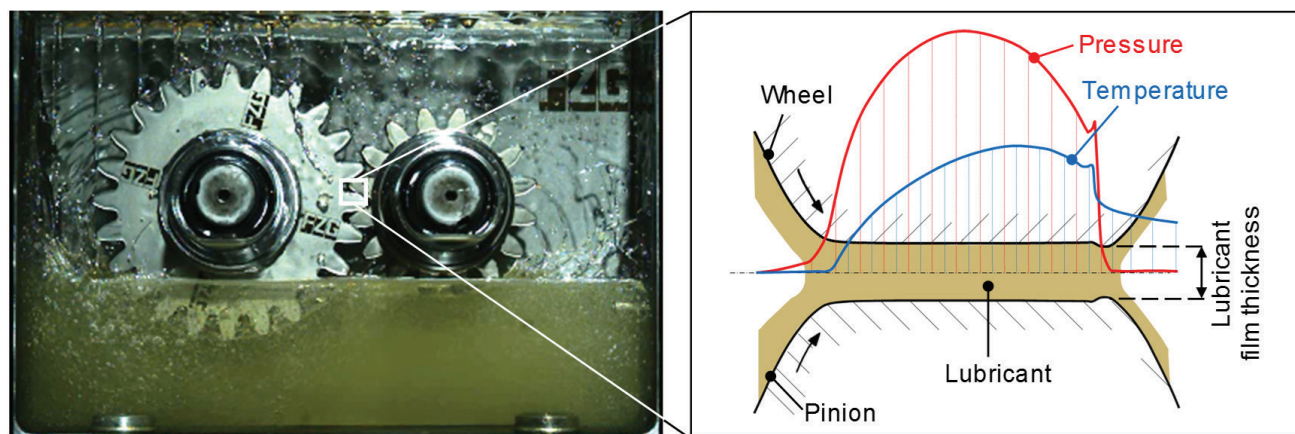


图 1. 正在运转的浸油润滑齿轮副的高速摄影图片 (左) 和弹流润滑接触示意图 (右)。图注: Wheel - 大齿轮; Pressure - 压力; Temperature - 温度; Pinion - 小齿轮; Lubricant - 润滑油; Lubricant film thickness - 润滑油膜厚度

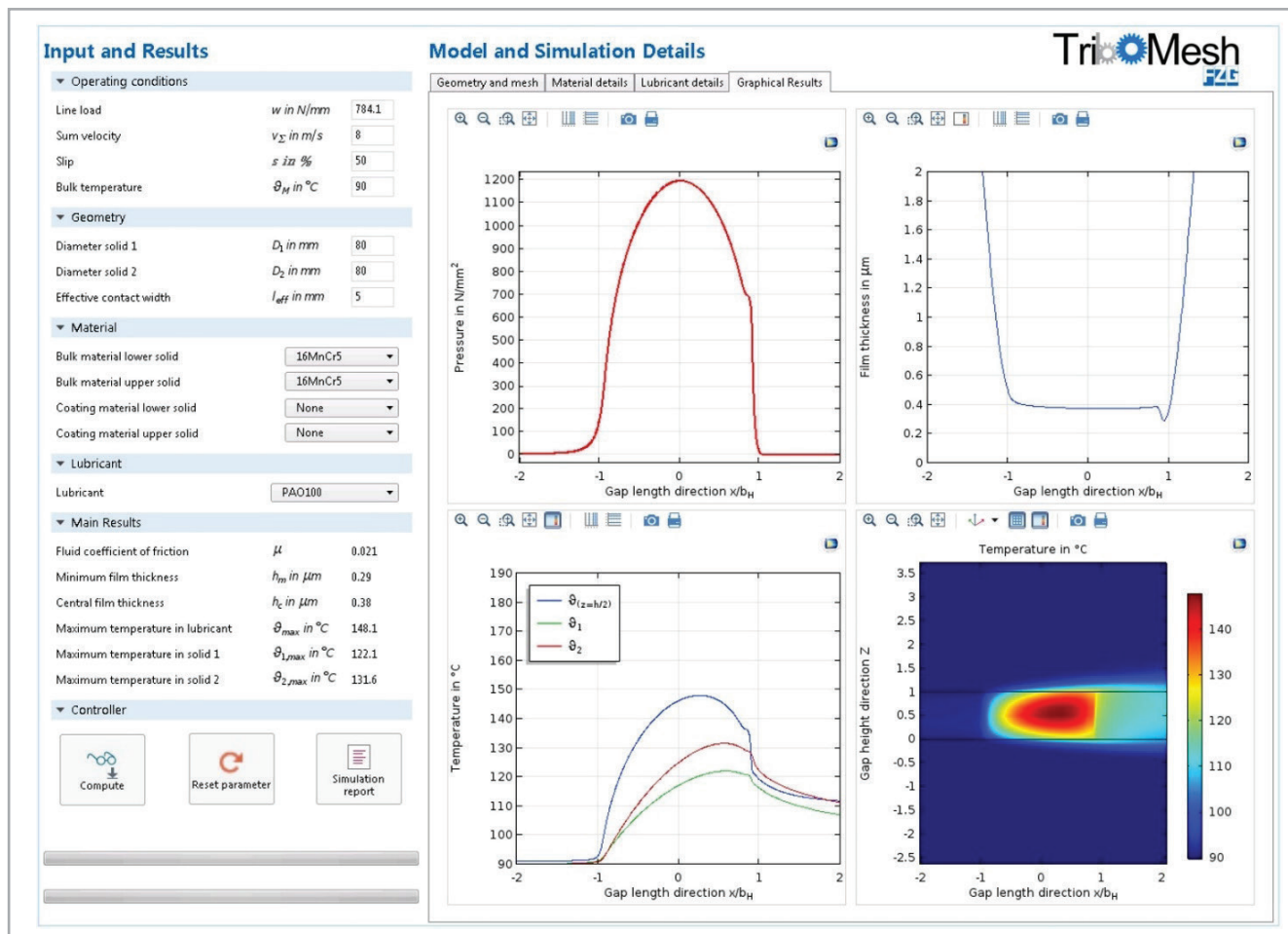


图2. 定制的仿真 App, 将复杂的热弹流润滑多物理场耦合求解结果封装到一个简单易用的工具中, 可供研究中心的所有人员访问使用。

## ⇒ 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<sup>[1]</sup>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<sup>[2]</sup>。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<sup>[1]</sup>, 并主要依靠软件提供的预定义接口来计算温度<sup>[2]</sup>。

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，从而降低润滑油的粘度，进而减少摩擦（图 3）<sup>[3]</sup>。“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 的使用心得：

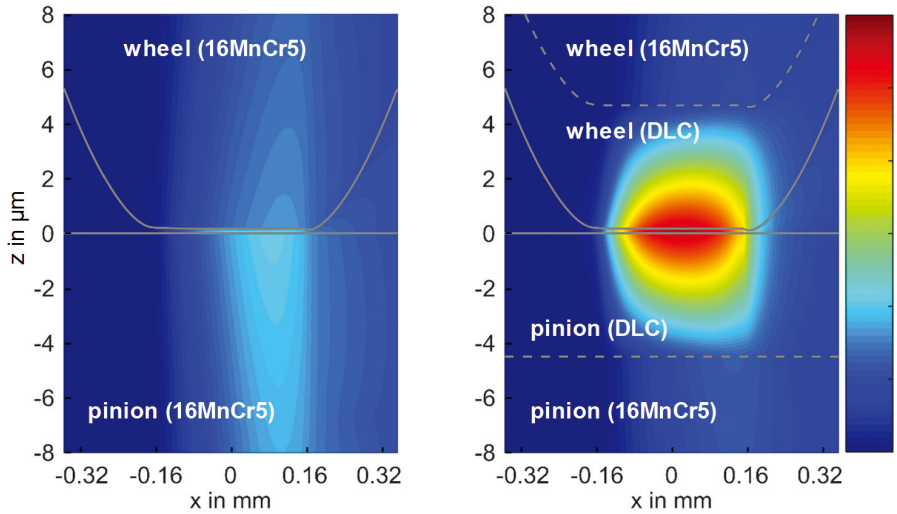


图 3. 热弹流润滑仿真结果：无涂层（左）和带 DLC 涂层（右）的齿轮副的温度分布。图注：Wheel - 大齿轮；Pinion - 小齿轮

“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 Zieglertrum, 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 Zieglertrum, 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 Zieglertrum；副研究员 Enzo Maier；系主任 Thomas Lohner；以及 FZG 教授兼主任 Karsten Stahl。