

# 会变形的润滑剂

直到近期，壳牌公司都一直在使用专有程序来模拟自动化行业中润滑剂的摩擦问题。但随着仿真复杂性的增加，壳牌的工程团队开始转向多物理场仿真来进行更深入的分析。

作者：Jennifer Hand

润滑剂可以提供更好的燃油经济性，或者说可以改进能源效率，它的需求很旺盛，市场也很广阔。作为一家独立咨询机构，美国柯莱恩有限公司评估 2010 年全球对润滑剂的需求量接近 3,800 万吨，约合 440 亿公升。

根据壳牌英国研发中心技术经理 Robert Ian Taylor 博士的看法，降低润滑剂粘度是提高能效的关键点之一，此外，对基础油的选择也非常重要。“润滑剂正朝着合成的方向发展，将通过矿物基油的更深层次加工来高度控制分子。现在也会加入一些称为摩擦改进剂的‘光滑的’化学添加剂。”

## → 弹流润滑的优势

通常情况下，润滑剂能够降低接触面的油膜厚度，进而减少摩擦，因此能实现较高的能效。当然如果油膜厚度变得过薄，就可能引起更高的磨损。因此，能够预测润滑剂属性对油膜厚度及润滑接触面摩擦的影响这一点尤其重要。

“当润滑接触面上的压力低于 200 MPa 时，例如滑动轴颈轴承或活塞环，可通过雷诺方程轻松求解预测油膜厚度和摩擦。” Taylor 评论道：“但是，也存在一些重要的润滑接触面，比如轮齿或滚动轴承，润滑剂中的压力可能会高达 3 到 4 GPa。在这样的高压下，润滑剂的

粘度会急剧增大，使金属表面出现弹性变形。在这两种效应的综合作用下，油膜厚度会高于预期，这也是此类高压接触可以成功润滑的原因。高压会促进而非妨碍润滑这一事实，看上去与我们的直觉不同。因此，关键是预测性能时综合分析这两种效应。”

这类润滑称作弹流润滑，正如 Taylor 指出的那样，要在如此高的压力下测量润滑剂的流变或流动并不容易，尤其是考虑到剪切速率也会高达  $10^8 \text{ s}^{-1}$ 。“在弹流润滑接触面，我们通常会得到远薄于 1 微米的膜，因此相应的剪切速率会更高。我们开发的任何数学模型都必须能够描述润滑剂流变特征的变化。”

模拟线接触润滑时，比如在稳定的载荷条件下沿平坦表面滑动的圆柱体，任何使用的方程都必须能考虑多种属性，包括润滑剂油膜在接触面不同位置处的厚度，决定润滑剂密度的对应压力，润滑剂的动力粘度、移动表面的相对速度、接触表面减小的曲率半径、表面减小的杨氏模量，以及单位长度的载荷。

“最后，我们得到了由于施加在表面的力造成的介质弹性变形的复杂解析表达式。” Taylor 说道：“应指出的是，润滑剂粘度是一个会随压力发生剧烈变化的函数。这些方程并没有一个非常明确的数值解，因为偏微分方程的特征会在接触的不同位置处发生变化。”

## → 综合分析以更好地理解润滑问题

使用多物理场求解器进行的有限元分析是一种综合考虑了所有参与效应的方法。“我们希望求解接触线或面上的雷诺方程；找到润滑剂中的压力；并使用计算得到的压力去分析底层表面的弹性变形；然后再根据变化后的表面形状来重新计算压力分布（见图 1）。”

壳牌团队发现在低于 1 GPa 的压力下，本方法的收敛性较好。对于由更高载荷带来的更高压力，则有必要在计算得到

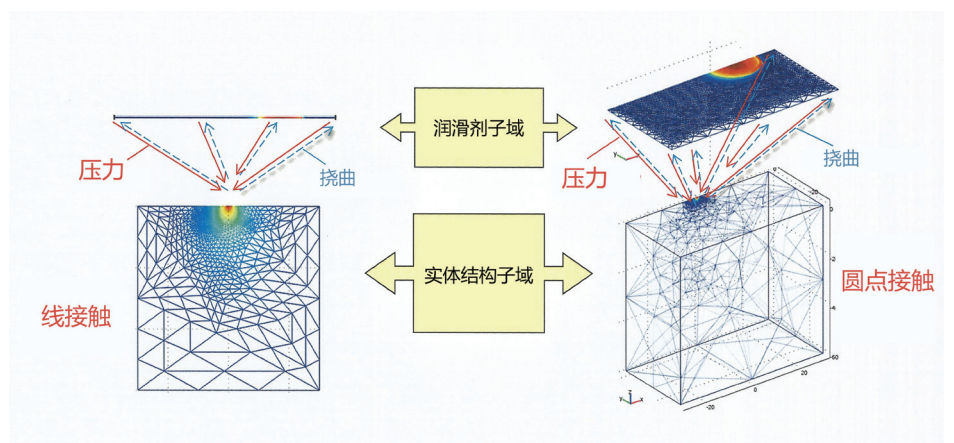


图1. 求解润滑剂问题的多物理场方法示意图。在线或面上求解了雷诺方程，计算得到的压力分布随即被用于计算弹性变形。重复该过程直到实现收敛。

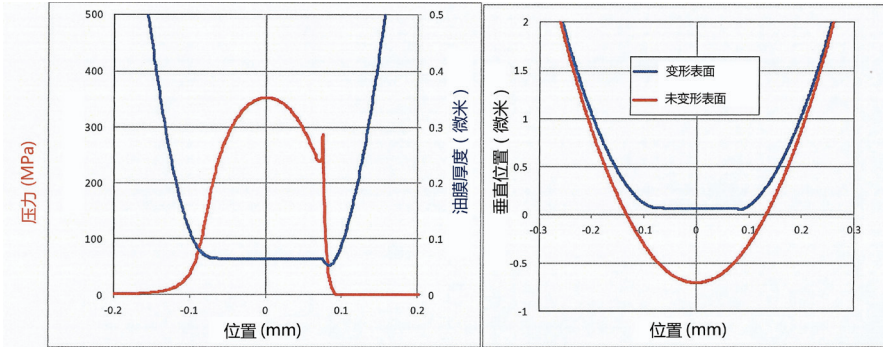


图 2. 弹流润滑线接触的油膜厚度（红色曲线）和压力（蓝色曲线）的典型计算结果。仿真对应于油温 373 K、接触夹带速度 10 m/s 这一典型的齿轮接触情况。结果来自壳牌公司的专有求解器。

的压力分布中抑制振荡。Taylor 解释说：“可以向雷诺方程中增加小的扩散项，更棒的是，可以使用流线迎风 Petrov-Galerkin (SUPG) 方法向原始方程中增加基于稳定项的残值。这种方法能够成功模拟压力高达 4 GPa 时的接触。”

多年来，壳牌团队利用他们的专有直接求解器进行了许多仿真，其中也用到了自适应网格剖分。该软件由 FORTRAN 和 C 语言混合编写，大约包含 20,000 行代码（虽然其中也包括求解器代码）。

“这一求解器在以下情况下表现很好：平滑表面、少量离散化节点，不含粘弹性的‘简单’流变；以及假定雷诺方程成立。”图 2 所示的结果来自这一求解器。

但是，很难对专有求解器的代码进行修改，它也给新人带来了一个较陡的学习曲线。壳牌团队的成员开始越来越多地转向 COMSOL Multiphysics® 软件来求解复杂的润滑剂问题（见图 3）。

➔微米量级上的模拟

过去三年中，团队同时使用了这两个系统，并确认 COMSOL Multiphysics 和他们自己的求解器所得的结果相同。“某些问题使用我们的求解器更容易求解，但对于更加复杂的分析，我们会使用 COMSOL。” Taylor 说道：“COMSOL

的一大根本优势是，我们一行代码也不用写就能开发出模型，这使模型的维护和修改变得更加简单。当我们需要考虑真实的润滑接触时，仿真变得更加容易。微米级别的接触面将变得非常粗糙，如果要精确模拟一个 3 mm 的典型接触面，我们大约需要 1,000 个节点来对其进行描述。如果使用专有求解器的直接方法，将占用更多的计算时间和内存。但我们现在可以使用多重格点方法，此时通常需要‘微调’多

重格点方法中的数值参数来实现收敛。”

➔将来的工作是测试点接触

壳牌公司的团队还对“点接触”润滑很感兴趣，比如滚动轴承。在全世界的各类机械中，大约包含几十亿此类零件。其中一些通过油脂提供润滑，这是一种粘弹性材料，而非液体润滑剂。“要对雷诺润滑方程进行大幅修改，才能将其用于粘弹性流体，多物理场仿真却可以通过全 Navier-Stokes 方程和正确的油脂粘弹性属性来求解同样的润滑接触。” Taylor 观察到：“由于大多数润滑接触面受到的载荷都会随时间变化，所以能够预测油膜厚度和摩擦随时间的变化非常重要。事实上，我们已经使用 COMSOL 分析了齿轮齿中的这类效应，这相当于线接触。”

当前，油脂润滑滚动轴承中接触的精确定模在许多公司的研究项目中都是一个相当活跃的领域，壳牌就是其中之一，Taylor 希望以后能更多地使用 COMSOL Multiphysics。❖

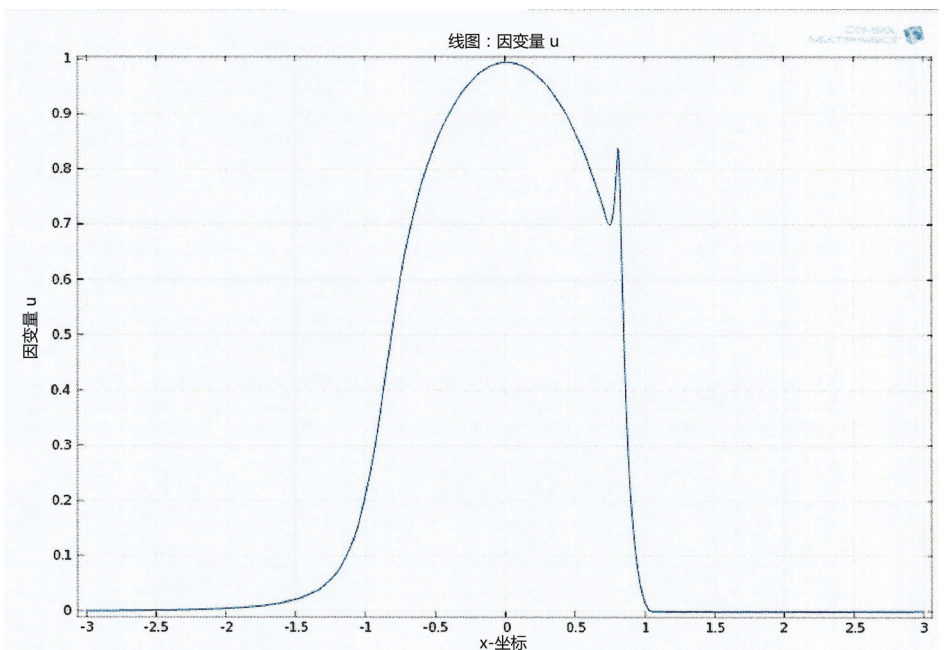


图 3. 使用 COMSOL® 软件计算的润滑线接触中的压力分布，条件与图 2 所用的相同。