

数值仿真

优化密封设计的数值仿真技术

如今，数值仿真技术应用在许多研发部门。在产品设计优化方面，为了向用户提供支持，瑞典一家公司为其产品工程师配备了由本公司研究中心开发的有限元工具。

文 | ANDREA BACCHETTO 和 ALEX X. PAYKIN

数值仿真在越来越多的产品的各个不同周期均扮演着重要角色（图 1）。此项技术有助于在方案研发以及样机制造阶段降低成本，有助于使经过优化的样机能够通过测试。

市场中各种各样的商业计算工具，被证实都非常可靠和通用。不过需要具备良好的培训基础的使用者加以使用，他们不仅能够熟练使用这些系统，还能够对它们的结果做

出解释，且懂得将这些转换成重要的方案。SKF 公司在数值仿真领域拥有多年的经验，不仅包括在使用商用仿真软件包方面，还包括在研发自身计算程序方面。

密封件作为单个器件的仿真

SKF 公司的工程师每天使用如 Orpheus 和 Beas 这样的工具，回答询问并向用户提供支持。使用自己研发的工具，SKF 可以用多种方式

和各种各样的复杂程度对滚柱轴承的应用进行仿真。这些经验和工具被不断地改进和提高，并配备了新的功能和新的性能特点，以便实现 SKF 的设想：对各种各样的组件，如轴承、轴、密封件、变速器和机械外壳等作为整体系统进行仿真（图 2）。

走向整体系统仿真的第一步是对作为单个组件的密封件进行仿真（图 3）。最初对单个构件的详细观察，使得 SKF 的工程师们对于已经组装好的密封件具备了更加全面的认识。

在对密封件进行数值仿真时，需要考虑众多因素。文中对于这些方面进行了简短描述，并对密封件仿真的复杂性进行了概括。其次还要有 SKF 研发的一项技术，为自己的产品工程师配备性能强大且可靠的软件。

模拟弹性材料性能的模型

如今许多技术上的计算都是基于这样的假设，材料的性能表现为线性的和弹性。一般来说，弹

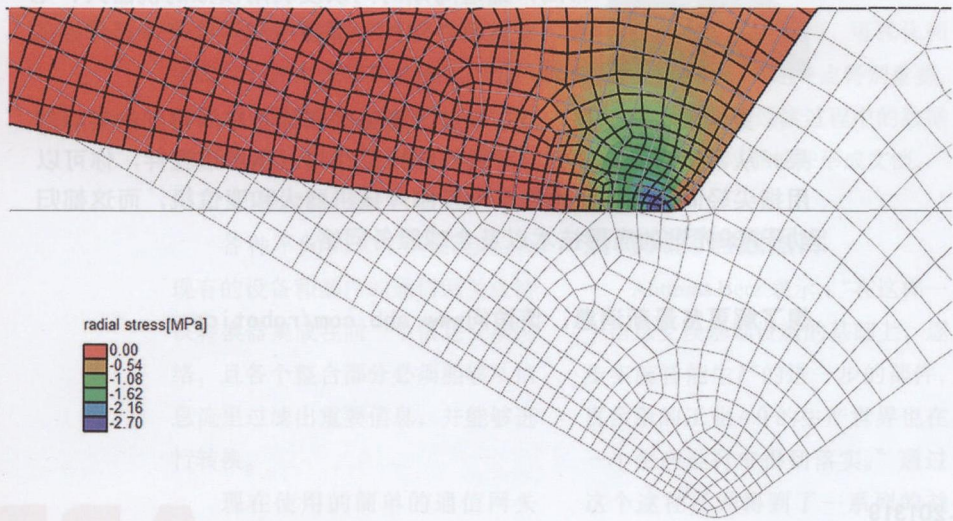


图 1 密封件与其固定的逆向旋转面接触仿真

性材料的性能表现不是线性。仅仅定义一个常数，以确定力和位移之间的相互关系或拉伸设置是不够的。相反，这需要有更加复杂的材料模型，才能够对多轴非线性进行操作。

例如，经常使用超高弹性的模型对弹性材料的性能进行仿真。这种模型虽然有弹性，但在超出一定范围时，应力 - 应变关系的非线性就会严重偏离线性性能（图 4）。此外，材料的性能在很大程度上取决于变形的取向。

弹性材料是最为常用的密封材料，因为弹性材料可以使密封件顺应逆向旋转面（轴、连杆或轴承）运动。因此，在对密封件进行仿真时，需要有可靠的方法来对超高弹性的材料模型进行仿真，这种方法可以理解多种取向上的大的变形。

弹性材料几乎不可压缩

弹性材料也是一种几乎不可压缩的材料，也就是说，被压缩在一起或被膨胀的弹性材料模型，其在变形前和变形后的体积变化几乎为零。这是一种材料性能，

图 4 丙烯腈丁二烯橡胶应力和应变关系。图中展示的是三个超弹模型实际数据和线性关系的比较

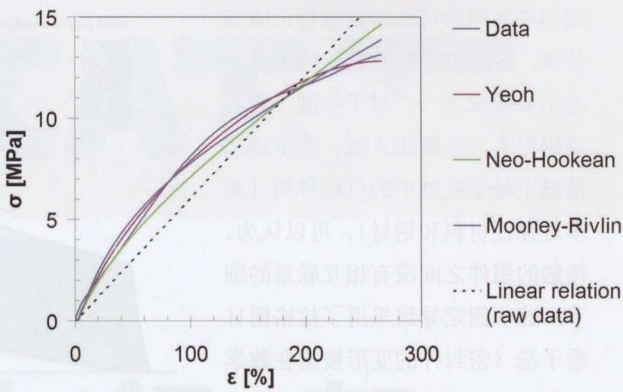
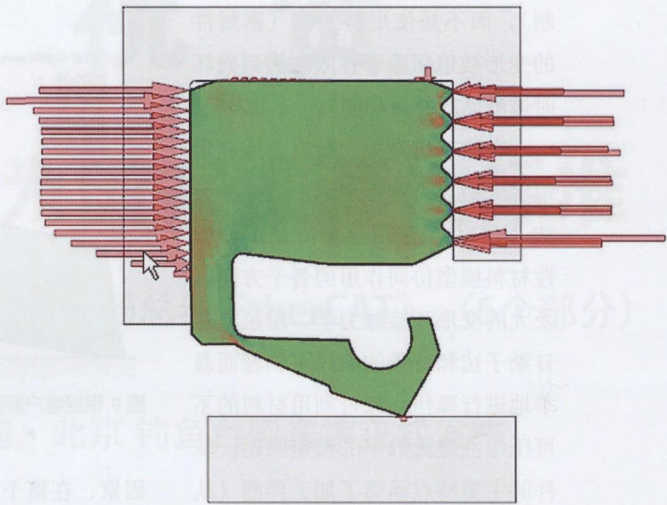


图 5 大直径密封件在固定外壳里的调准仿真



这种性能使传统仿真件的数字方法面临困难。材料的不可压缩性造成数字上的不稳定性，这种不稳定性一般被称为体积的锁定。为了抑制这种锁定效应，专门对

积分图进行编码，目的是取得精确而稳定的结果。

在文献检索过程中，找到了一种解决体积锁定的 F-Bar 方法，采用这种方法时，需要对文献中所描述的传统积分法做出改变。在这个方面，与大学的合作，特别是与荷兰 Twente 大学的合作，为编码算法的正确性和精确度提供了保证。这样，计算的质量可以和采用商业通用的 FE 程序，如 Abaqus、Marc 或 Ansys 所做计算的质量相互媲美。

接触力学处理极端

径向轴密封环在钻孔和轴之间安装时必须有一定的尺寸裕量。所以密封件与围绕的表面（外壳、轴、离心板或轴承）之间接触的仿真非常重要（图 5）。

为了能对密封件和应用的周



图 3 汽车密封件（左）和工业密封件展示了密封件的复杂性

围部件之间的尺寸裕量进行正确的仿真，接触力学是开发软件工具时的主要要求之一。对于接触，数字编码中有许多解决方案。鉴于正常情况下处于接触中的材料种类（大多是弹性材料和钢材），可以认为，接触的组件之间没有相互联系的细节。这一假定导致采用了拉格朗日乘法（密封件的变形被迫在数学上相当于周围逆向转动面发出的限制），而不是使用补偿法（密封件的变形被迫屈服于在限制遭到破坏时被激活的补偿功能）。

在数字仿真中，所有上述应用组合的最大可能性是利用有限单元法（FEM）。采用这种方法，超弹性材料模型协同作用的各个方面以及大的变形和接触力学，用拉格朗日乘法 and 特殊的编码可以轻而易举地进行操作，且可利用材料的不可压缩性避免数字的锁定问题。软件的主要特点涵盖了加工预测（从工具到成品几何尺寸的衰减）和性能预测（安装在轴上和 / 或机壳里）两个方面。

SKF 产品工程师们利用加工仿真的可能性，改进对最终有效的密封件形状在定型前的方案调研。这一行动同样也有助于改善模具的几何形状尺寸，由于这这也是一个成本

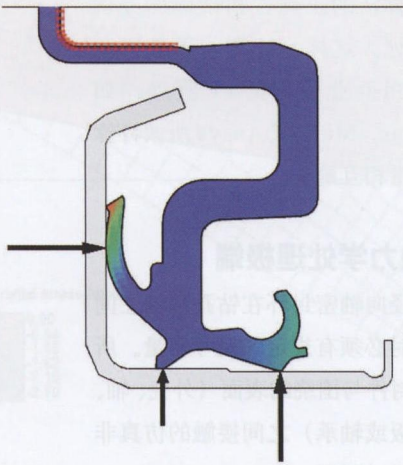


图 6 用 SKF Seal Designer 无拉伸弹簧安装仿真

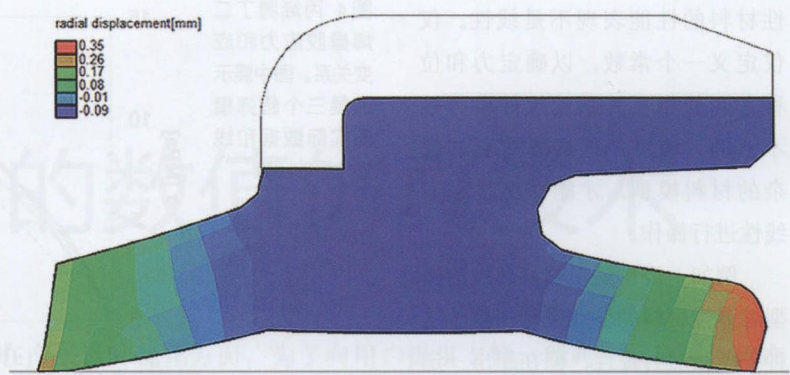


图 8 现有的 Abstreifer

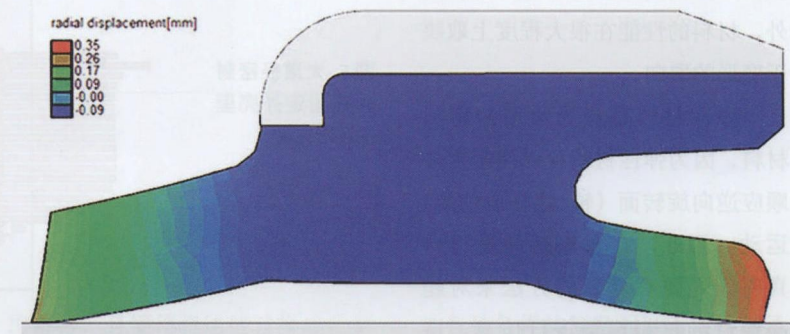


图 9 根据客户新提出的要求改变了的 Abstreifer：外壳变小，径向负荷相同

因素，在整个方案编制过程中是最重要的阶段之一，且因为模具的几何形状尺寸以后也可以继续用于其他的方案。

对安装在轴上的密封件计算的可能性

另一个功能特点是对安装在轴上的密封件进行计算的可能性。

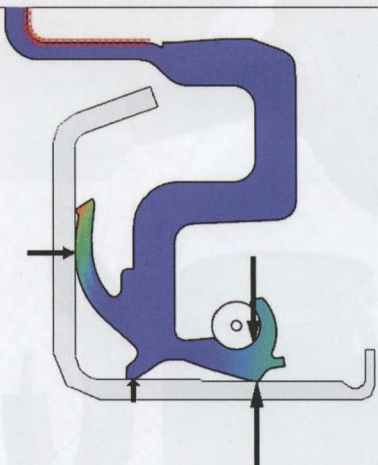


图 7 用 SKF Seal Designer 有拉伸弹簧安装仿真

装好的密封件上的密封膜对逆向旋转面产生挤压力（图 6）。在静态和动态运行条件下，这是最重要的参数之一。密封膜的挤压力有助于增加所希望的密封性，但对密封膜下面的摩擦也承担主要责任。

另外也可以使用拉伸弹簧，以便在密封材料老化时维持密封性所需要的挤压力（图 7）。因此，准确地预测密封膜在各种不同运行条件下的挤压力，是对仿真软件工具的决定性的要求，利用这个工具，既可减少编制方案的迭代次数，也可以加速新产品上市的速度（图 8 和图 9）。

有了 Seal Designer，SKF 产品工程师可以利用 FE 仿真的全部功能。这个软件工具缩短产品上市时间，且使产品工程师能够对密封参数、用户的设计要求以及应用方面的特殊需要应如何作用于密封性能的方法做出虚拟判断。MM