

用 Tosca 求解带接触边界条件的拓扑和外形优化问题

王立朋编译，CAEDA 公司

1. 背景介绍

1.1 Tosca 最优化系统

Tosca 是标准的非参数优化系统，可以对有限元模型进行任意载荷和约束条件的拓扑、外形优化及薄壁结构条纹优化。Tosca 在优化过程中无需对模型进行参数化，这就大大减少了工作量提高了最优化结构的适应性。其基于力学最优化标准的优化算法使其优化过程快速而稳定。

使用Tosca进行结构最优化设计是一个反复迭代的过程，在每一个迭代步中都采用外部的有限元求解器计算结构的力学响应。通过采用业界认可的标准求解器而获得高质量的计算结果，这些求解器包括：ABAQUS，ANSYS，I-DEAS以及MSC.NASTRAN、MARC等。这样做的另一大优点是用户可以在自己熟悉的求解器以及前后处理环境下工作，而不需培训来熟悉另外一个陌生的软件环境，现有的有限元模型可以直接应用于优化计算中。

通过Tosca内部各程序的相互作用可以完成新产品结构CAD/CAE系统中从概念到成品的闭环优化设计过程。如图1所示。

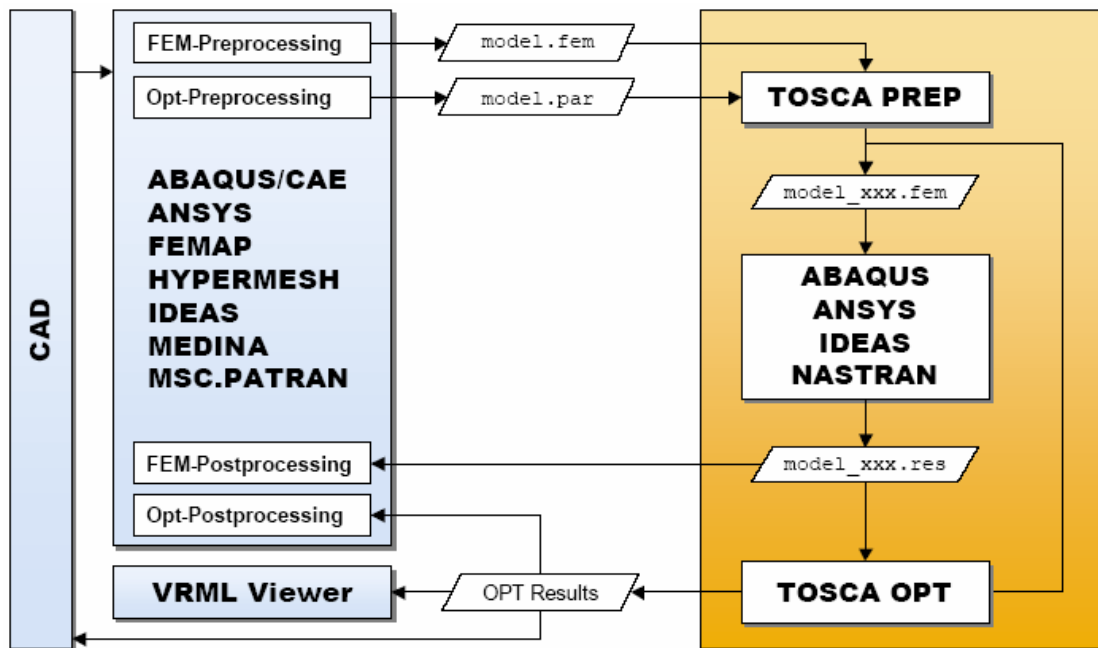


图1 Tosca最优化设计分析流程图

1.2 带边界条件的结构优化问题

在一个新零件的设计过程中，通常不会给定精确的边界条件，这就可能会出现涉及接触问题的非线性接触条件问题。在零部件优化迭代过程中随着几何外形的不断修正，接触条件和传力路径都会有所变化，因此必须考虑到接触条件的影响。

一个简单的方法是将接触条件简化为节点力，但这将导致出现不理想的优化分析结果，况且，这是一个耗时耗力的过程，是在快速、高效的开发过程中必须尽量避免的。因此，在结构最优化设计的优化区域允许添加直接的接触条件是大势所趋。

Tosca 的建模方式使得我们能够像往常那样在各种有限元求解器中处理这个问题。使用者首先基于自己使用的求解器建立带所需接触条件的分析模型，然后定义优化任务。在优化算法中无需专门处理模型中已存在的接触条件。通过接触力及其结果应力，接触问题就被隐

含在了最优化过程当中。这势必能够充分发挥 Tosca 使用者所采用的接触算法的功能优势。

2. 轴接触外形优化

2.1 分析模型

下文所述的外形优化实例是一个真实的工业案例。福特汽车公司提供了一个轴接触问题 ABAQUS 模型，是其 1.25/1.4 ZETEC-SE 型发动机的一个零部件，包括 8 个部分，各部分之间通过接触定义互相连接，如图 2 所示。该模型已是零部件的最终设计方案，因此应力水平及其他性能都已进行了充分的手工改进，基本满足设计要求。

本案例采用 ABAUS6.1 版，在 HP C3700 工作站上总共计算 4 个小时。

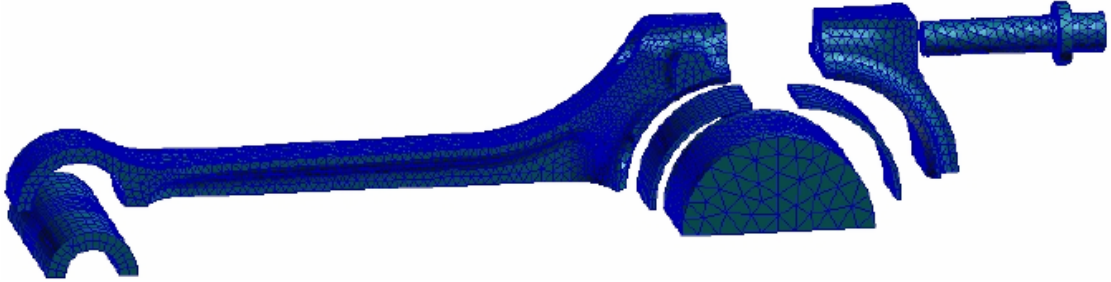


图 2 福特 1.25/1.4 ZETEC-SE 型发动机零部件轴接触模型

整个加载过程分为如下 6 个步骤：

1. 挤压活塞销，拉紧螺栓
2. 确定螺丝载荷
3. 通过施加一个控制位移对拉伸载荷下的接触初始化
4. 求解最大加速下的配合力和惯性力（最大拉伸载荷）
5. 通过施加一个控制位移对压缩载荷下的接触初始化
6. 求解最大扭矩下的气压和惯性力（最大压缩载荷）

需要特别指出，惯性力真实模拟了施加在单元上的真实惯性载荷，在优化过程当中几何外形的修正会引起实际受力状态及时、准确校正。

还应注意的是，在优化过程中采用的模型无需任何修正，这使 ABAQUS 使用者非常容易上手，其各种非常复杂的模型都可以直接拿来进行优化分析设计。对于其他有限元使用者也是同样如此。

2.2 最优化设计

采用 Tosca 进行外形优化设计可以取代传统的手工方法对零部件原始设计进行修正改进。首先对一个现有的有限元模型进行分析，然后基于分析结果参考 Tosca 优化标准不断进行改进，直到得到满意的设计方案为止。这个过程自动化完成，势必大大缩短设计开发周期。

之所以称 Tosca.shape 外形优化设计为“非参数化”，是因为整个优化区域仅仅简单指定为可以修正其位置的多个节点，无需定义可变的具体几何参数或者外形基本向量，这样的参数化优化方法势必会引起对可设计空间的限制。

福特 1.25/1.4 ZETEC-SE 型发动机零部件的优化目标是通过修正连杆的内轮廓线以使第 4 步和第 6 步的最大 von Mises 应力最小化。这样将使该零部件为福特汽车为将来换装更强大的发动机提供充足的强度裕度。

优化区域选为通过一个节点群（Group）定义的所有内轮廓线上的节点。连杆上的单元定义为网格自适应平滑化区域，以此来保证涉及区域的节点位置被修正后仍然会是一个高质量的网格划分体系。整个优化过程在 5 个迭代循环后即终止。

优化前的最大 von Mises 应力分布如图 3 所示。在曲轴附近的内轮廓线上可以看到较为明显的由压缩载荷引起的应力集中现象。图 4 显示了经过五个最优化迭代循环后的修正设计

方案的最大 von Mises 应力分布。可以明显看出设计区域内的应力分布趋于均衡合理。

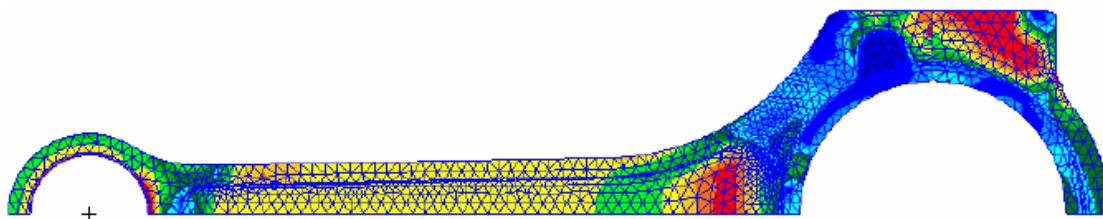


图 3 初始设计的 von Mises 应力分布

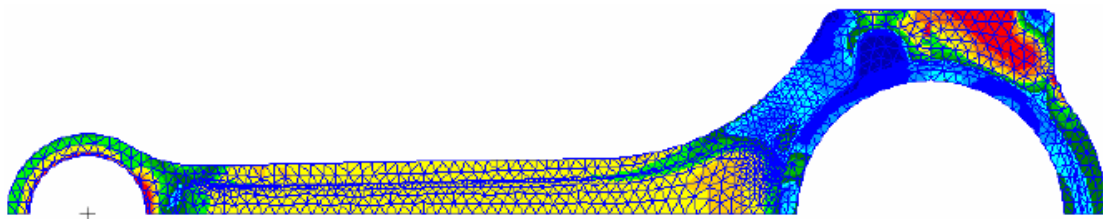


图 4 在 5 个优化设计循环后的 von Mises 应力分布

最优化过程中在拉伸与压缩载荷下的最大 von Mises 应力变化趋势如图 5 所示。可以看出，仅仅在 5 个设计循环中最大应力就降低到了原始设计方案的 83%。采用 Tosca 进行最优化设计快速而且高效，能够大大缩短设计开发时间并提高产品性能。

需要强调的是，正如前文所述，初始优化模型已经采用传统的手工方法进行了多次改进设计。显然，如果一开始就采用 Tosca 进行优化设计，产品性能会提高的更为显著。

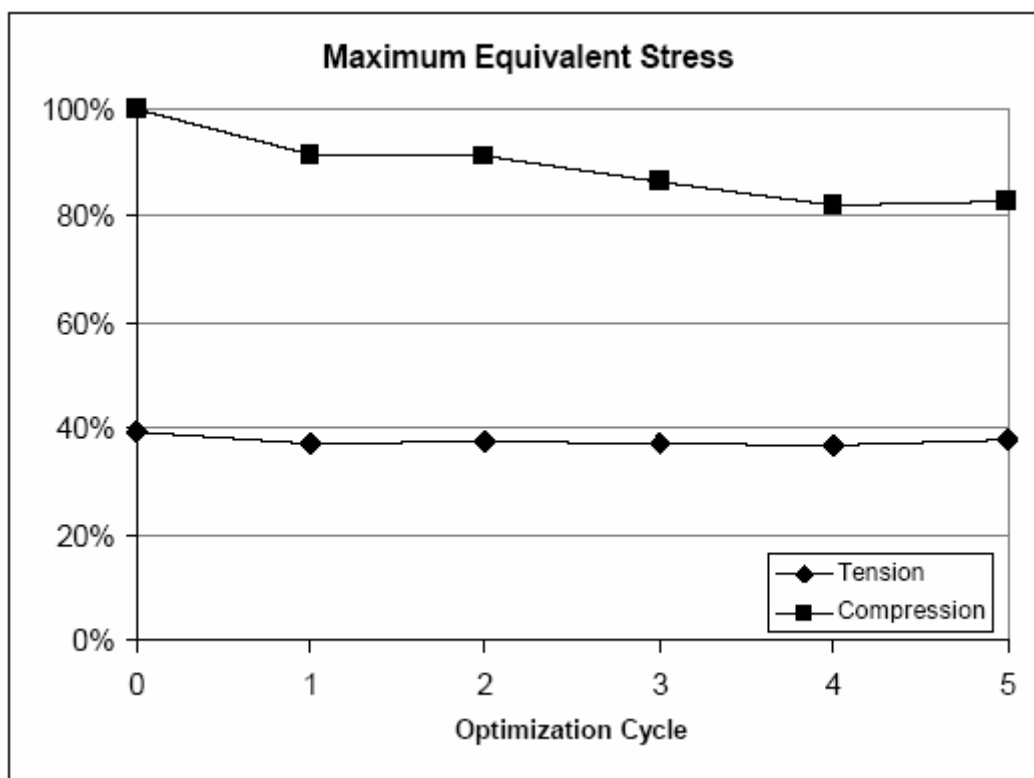


图 5 第 4 和第 6 步中设计区域的最大 von Mises 应力

改进后的几何模型可以直接由有限元模型获得，还可以由 Tosca 导出为 STL 或者 IGES 格式的面元文件，然后导入到 CAD 系统进行进一步的处理。

3. 带接触分析的拓扑优化问题

下面将通过福特 1.25/1.4 ZETEC-SE 型发动曲轴连接案例为例演示带接触分析的拓扑优化问题解决方案。该零部件的设计空间大致来源于原始的几何尺寸。分析模型设计空间内包括连杆、活塞销以及部分轴承（如图 6）。根据对称性，只对四分之一的几何模型进行建模分析。连杆部分建模为一个实体，忽略了连杆和轴瓦之间的螺栓连接。固定对称面上的节点法向位移。曲轴外表面的节点在沿着连杆方向（受力方向）固定。用 MPC 单元关联活塞控的外表面结点与活塞控制节点。活塞质量简化为该节点的一个质量点。在三部分之间的相应部位设置接触面。

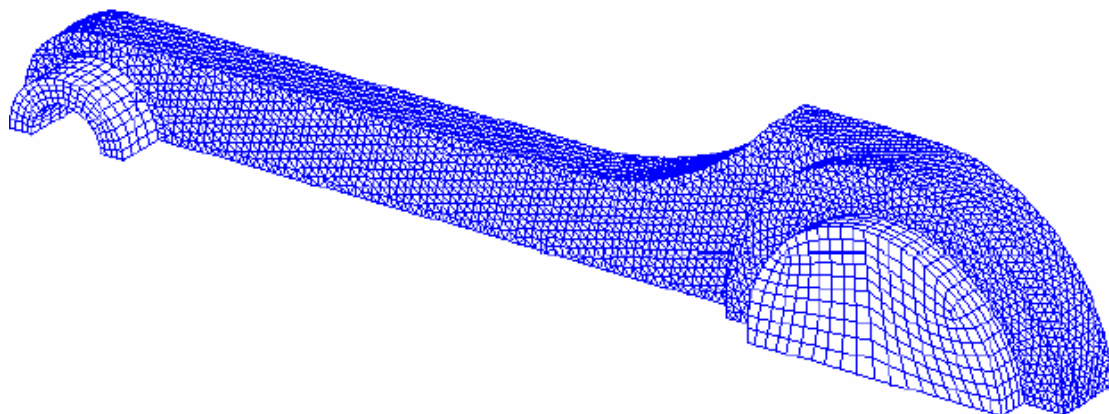


Fig.6 连杆可设计空间

施加如下的加载历程：

1. 通过在活塞控制节点上施加控制位移初始化拉伸载荷接触
2. 最大加速度情况下（最大拉伸载荷）的集中力和惯性力
3. 通过在活塞主节点上施加控制位移初始化压缩载荷接触
4. 求解最大扭矩下的气压和惯性力（最大压缩载荷）

优化目标为在保持与原始零件体积相同的情况下刚度最大化。相应就是将设计空间的体积缩减到原始值的 53%。在第一步中，没有设置约束条件，因此即使是接触面上的单元也可能被弱化而被“优化”掉。

在优化过程中，根据材料分布的不断修正，基于单元真实惯性载荷的模型惯性力同时得到不断的自动修正。

整个优化过程共 17 个最优化迭代循环步骤，每个步骤都要进行一次独立的 ABAQUS 分析。根据优化算法，通过单元有规律的逐步软化材料分布渐趋合理，最终形成由实体和空单元两部分组成的二元模型，此模型在在给定载荷下具有最大刚度。拓扑优化后，经过 Tosca.smooth 模块可以计算出最终材料分布的等势面，此平滑表面即为最优化设计样机。该表面可以通过 STL 或者 IGES 格式直接导入 CAD 系统形成一个全新的基础设计方案。

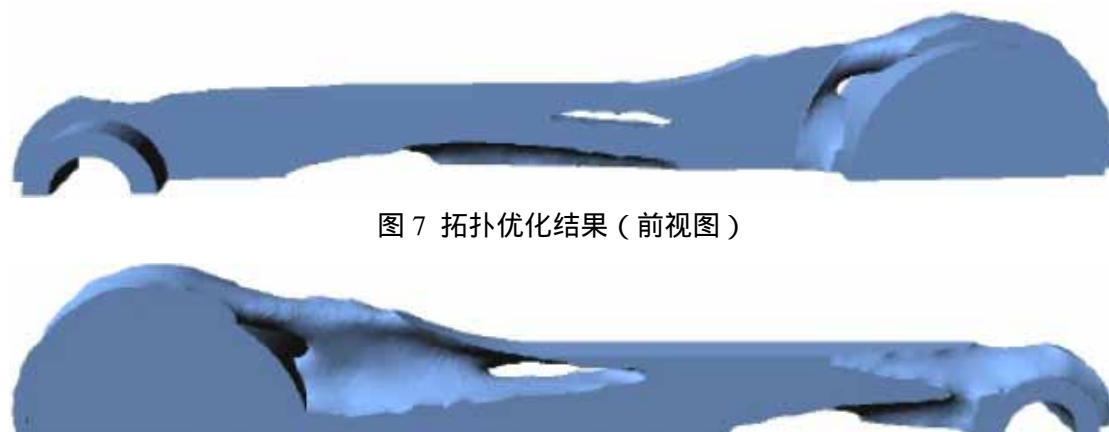


图 7 拓扑优化结果（前视图）

图 8 拓扑优化结果（后视图）

拓扑优化的结果如图7（前视图）和图8（后视图）所示，沿着拉伸和压缩的传力路径分别在轴承顶部和轴瓦中部形成两个传力杆，这显然不能满足设计要求。两条传力路径差别如此之大以至于在两条主要路径之间的单元在优化过程当中被弱化。在这个优化设计方案中可以发现几个明显的材料集中区域（尤其是连杆上表面），这就提示我们如果在此区域扩大设计空间将会得出更好的设计方案。

由于在第一次优化过程当中没有考虑到制造工艺条件，优化结果是一个满足载荷条件的理想化最佳传力路径。在第二次优化中我们将添加适当的约束条件，包括将曲轴上轴承的接触单元“固结”（Freezing）住，以及考虑铸造条件的工艺约束，该工艺约束使最优化设计后的零件产品就能方便地沿着Z方向（曲轴轴线方向）从铸模中分离。在Tosca4.5版中就已加入了铸造工艺约束，该项技术使拓扑优化结果可以更加直接的应用于实际制造。



图9 带制造工艺约束条件的拓扑优化结果

带制造工艺约束条件的拓扑最优化设计结果如图9所示。该设计方案在主要特征上与第一次计算的结果很相似，但因考虑了制造工艺条件而具有实际使用价值。拉压两条传力路径仍然清晰可辨，且其直径与所施载荷大小相当。可以看出在活塞销附近的材料富集区，这是因为此处连杆表面上具有较大的应力分布。

Load Case	Original Model	Result from Topology Optimization
Tension	0,564	0,649
Compression	1,000	0,695

表1 优化前后活塞控制点的位移量对比

拓扑优化能够改善模型的刚度。基于使模型中应力均匀化的优化算法，模型中活塞控制点在两种载荷下的位移趋于近似相等。如表1所示。通过对比可以看出，与原始设计方案相比，优化设计方案的压缩刚度降低，但拉伸刚度增强。

4. 接触面直接优化技术

Tosca能够直接对接触面进行优化，使其接触力更加均匀。用户可以使用Tosca.shape模块直接对不同外形的接触面进行优化以消除接触力中的异常分布状态，采用这一技术可以对诸如过盈配合以及大小不同零部件的连接问题进行优化设计。

5. 结论

在早期设计开发阶段引入结构最优化工具将充分发挥CAE设计分析的潜力，其拓扑和外形最优化技术将提高开发效率并提升产品性能。您的产品将更轻、更强、更稳定，从而使您的公司具有无以伦比的竞争优势。

通过直接调用当今所有主要有限元求解器，Tosca最优化系统为解决实际结构的最优化问题提供了一套综合的解决方案，这已得到了业界的广泛赞同。通过与非线性软件ABAQUS的接口，Tosca就能够轻而易举的解决带接触条件的结构优化问题。