

FEM之多物理场求解器(2)---C++开发热-结构耦合求解器

原创 www.cae-sim.com [多物理场仿真技术](#)

收录于合集

#仿真研发工具 25

#软件研发测试工程师 17



本文主要介绍FasCAE三维热-结构开发稳态相关细节，包括理论基础，测试用例以及和Ansys做benchmark

在 FEM之多物理场求解器(1)---C++开发热-结构耦合求解器一文中介绍了分别利用 3D**热求解器**和**结构求解器**求解三维稳态热结构耦合问题，本文介绍热求解器开发的更多细节。虽然热和结构有限元理论已经很完善，而且单元矩阵和算法公式也已经推导出来，但要开发出能和商业软件相同的求解器还是有很多工作要做。工欲善其事必先利其器，列出需要做的基础准备工作：

1. 与Ansys 做benchmark:

- 1.1. 需要解析Ansys有限元模型，开发Ansys2Fas.exe 以解析 *.cdb文件；
- 1.2. 求解的结果要与Ansys比较，需要导出Ansys计算结果；
- 1.3. 原始的结果数据通常都经过处理，所以需要设计统一的结果文件格式；
- 1.4. 开发后处理器用于查看结果；
- 1.5. 精度性能比较程序；

2. 为了将求解器产品化，需要开发前处理器，仅这一项又是不少的工作：

- 2.1. 在前处理器中要能把有限元模型导出为*.cdb格式。
- 2.2. Ansys除了简单的单元类型还有许多扩展的单元类型，前处理器中需要支持。
- 2.3. 为了验证Ansys的准确性，能导出第三方软件格式，比如Abaqus，Nastran

3. 在求解器设计之初需要考虑到单元类型，边界条件，荷载等扩展需求，定义好接口。

热求解器

1. 支持功能：

单元类型	边界条件	材料类型
线性四面体	第一类边界条件	相同材料
二阶四面体	第二类边界条件	两种材料
线性六面体	第三类边界条件	多种材料

2. 理论：

稳态热的偏微分方程相对来说简单，在求解开发中有些要注意的问题：

2.1. 对于热分析，线性四面体单元通常就能产生较高精度的解，但对于很多结构，线性四面体的刚度过大，需要使用二阶四面体单元。在两者耦合计算时就存在单元兼容的问题，虽然可以温度采用线性单元，结构采用二阶单元，精度上会有影响。

2.2. 当存在多种材料时，材料接触部分要保持连续，即几何需要使用非二维流体，网格划分也要支持此种类型。对前处理器提出了更高的要求。Nastran要求不同材料接触部分网格要保持连续，观察过Ansys的接触部分网格可以不连续，姑且不讨论这样对不对，如果Ansys支持这样的网格，起码在接触部分求解器需要做额外处理。

2.3. 公式

四面体和六面体都使用常规单元即可。矩阵推导过程与弹性力学完全，而且因为一个节点只有一个自由度，比经典弹性力学的刚度矩阵要简单。热传导的最后计算公式为：

$K \cdot t + C \cdot T' = P;$

该公式中K为热传导刚度矩阵，t为温度分布，C为储热刚度矩阵，T'为对时间导数，P为温度荷载

当P为0时，变为自由温度分布；

当T'为0时，变为稳态方程；

当P，T'都为0时候，就是最简单的稳态温度分布；

3. Benchmark：

以下四个测试用例基本上覆盖了稳态热求解器功能。

- 3.1. 测试用例1: 线性四面体，第一类边界条件，两种材料；
- 3.2. 测试用例2: 二阶四面体，第一类边界条件，两种材料；
- 3.3. 测试用例3: 一阶四面体，第二类边界条件，两种材料；
- 3.4. 测试用例4: 二阶四面体，第一，二类边界条件，三种材料；
- 3.5. 测试用例5. 二阶四面体，复杂几何；

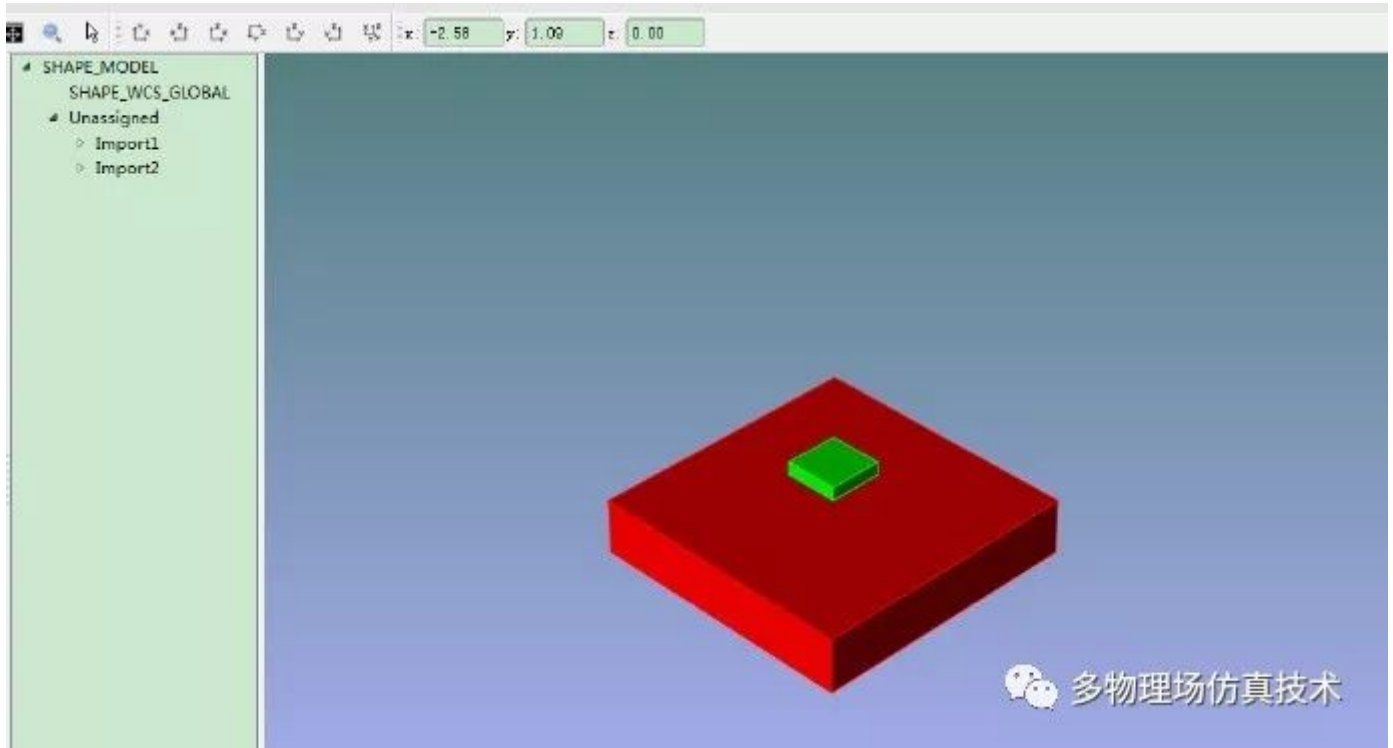
4. 实现：

第一个测试用例详细讲一下分析实现过程，后面的测试用例都类似。

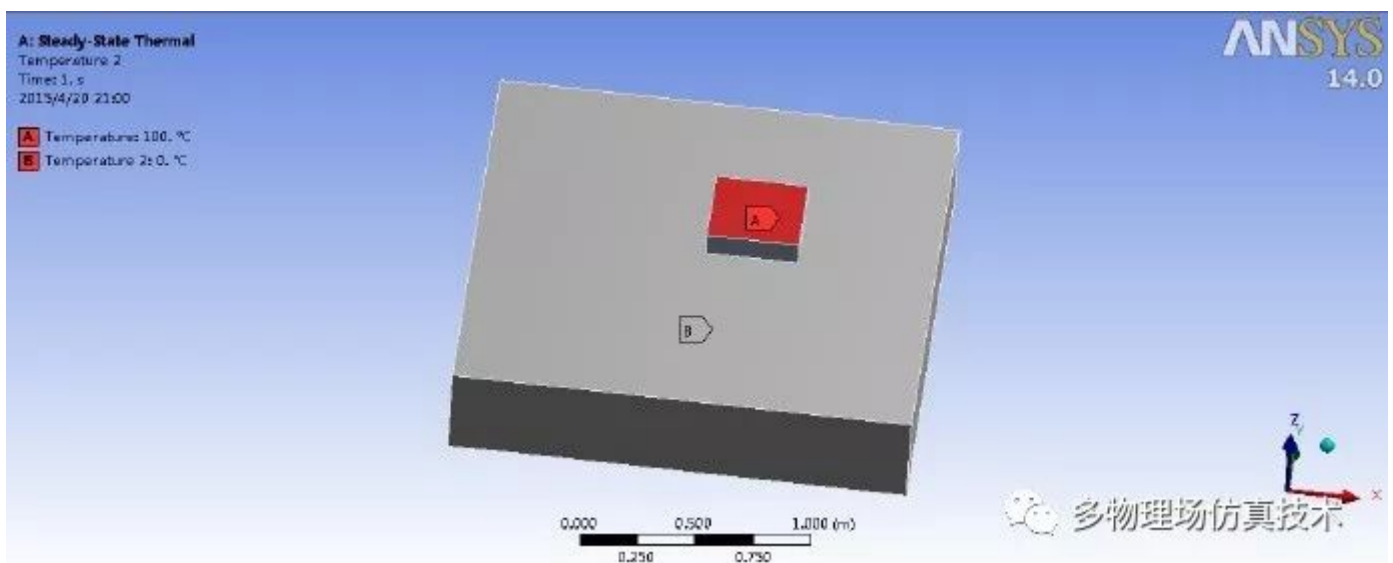
4.1 测试用例1

上下两个接触的长方体，材料不同，上部长方体上表面温度100度，热导率20；下部长方体下表面温度0度，热导率4000，采用线性四面体单元，求温度场分布。

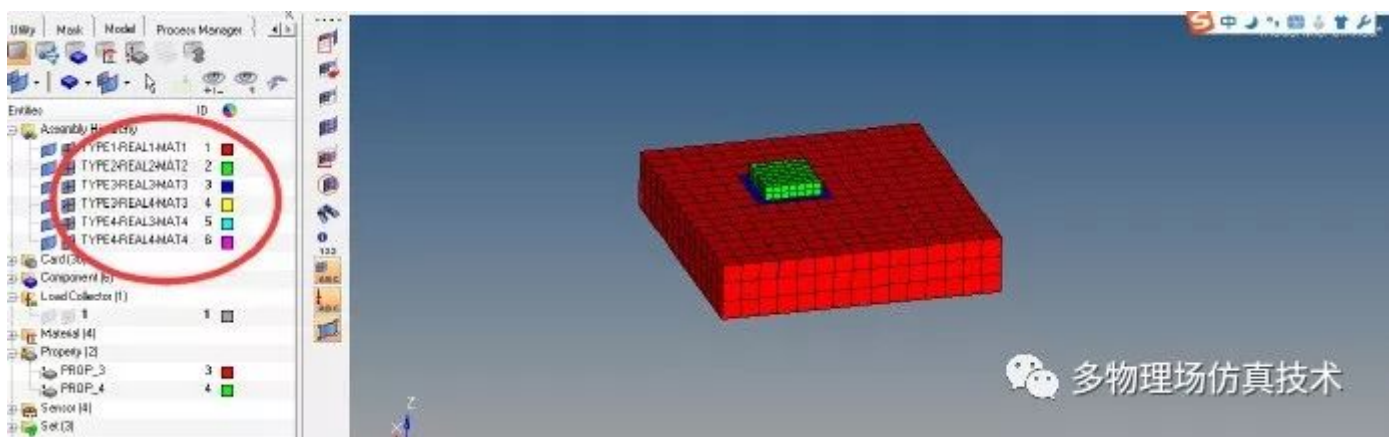
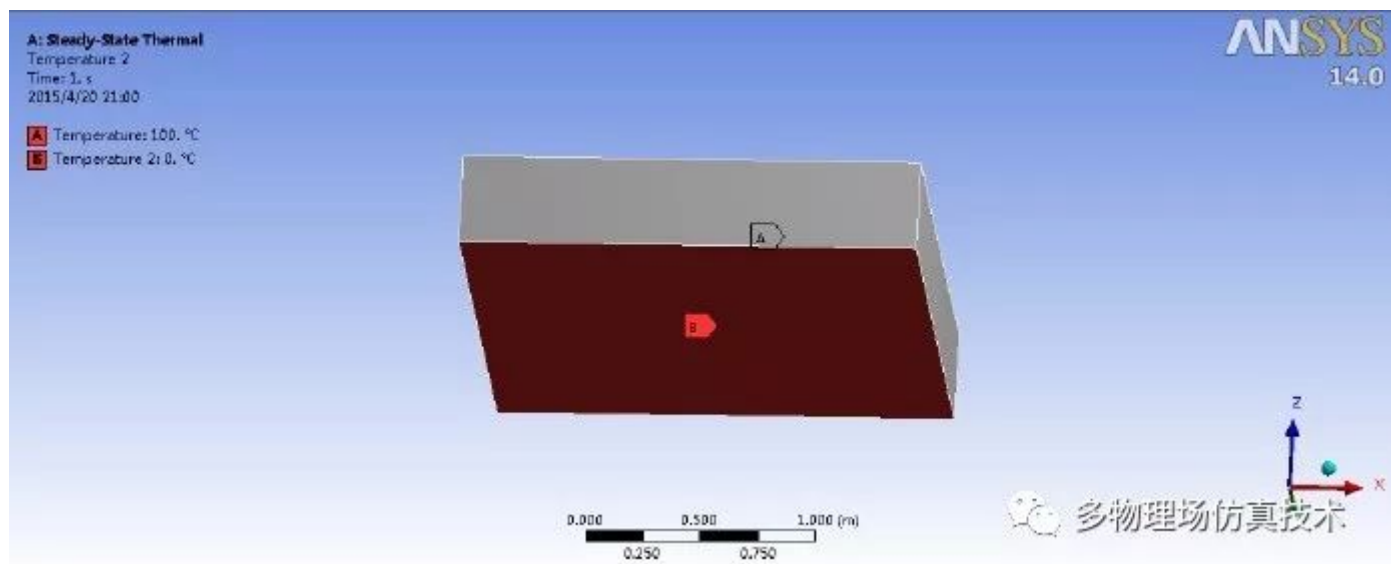
4.1.1.几何：



Ansyes的 WorkBench中进行前处理：

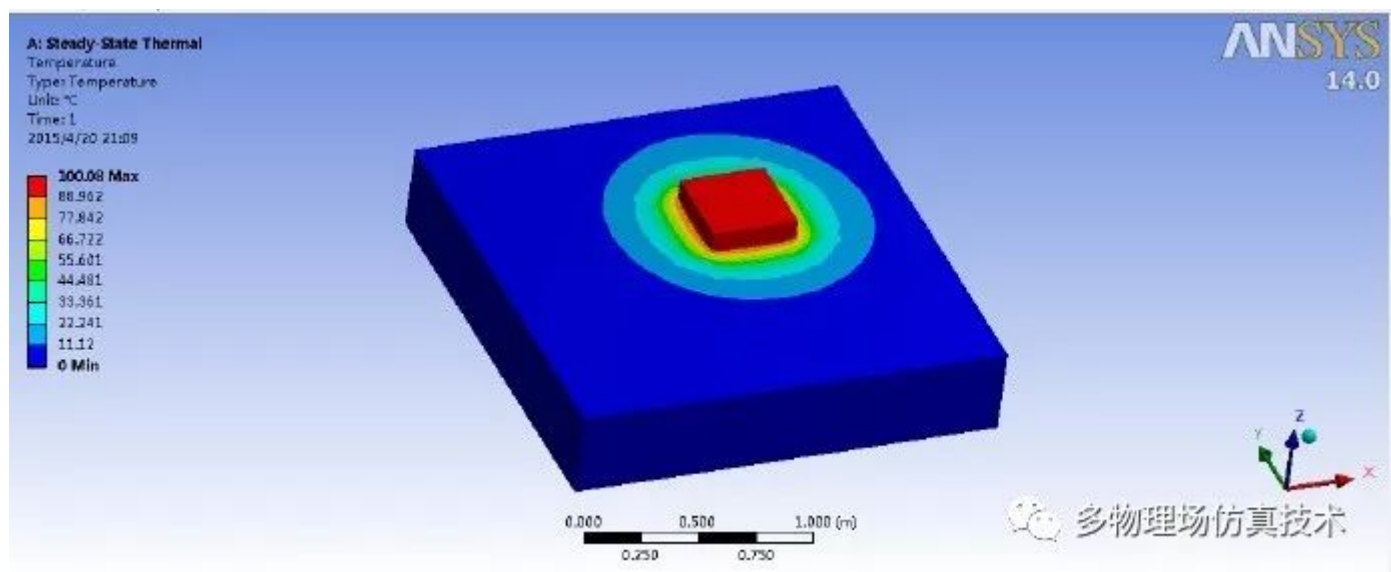


将工程导入到传统的Ansys，将模型导出为*.cdb文件。在HyperMesh中打开*.cdb文件可以观察到有限元模型实际上分成了5部分：

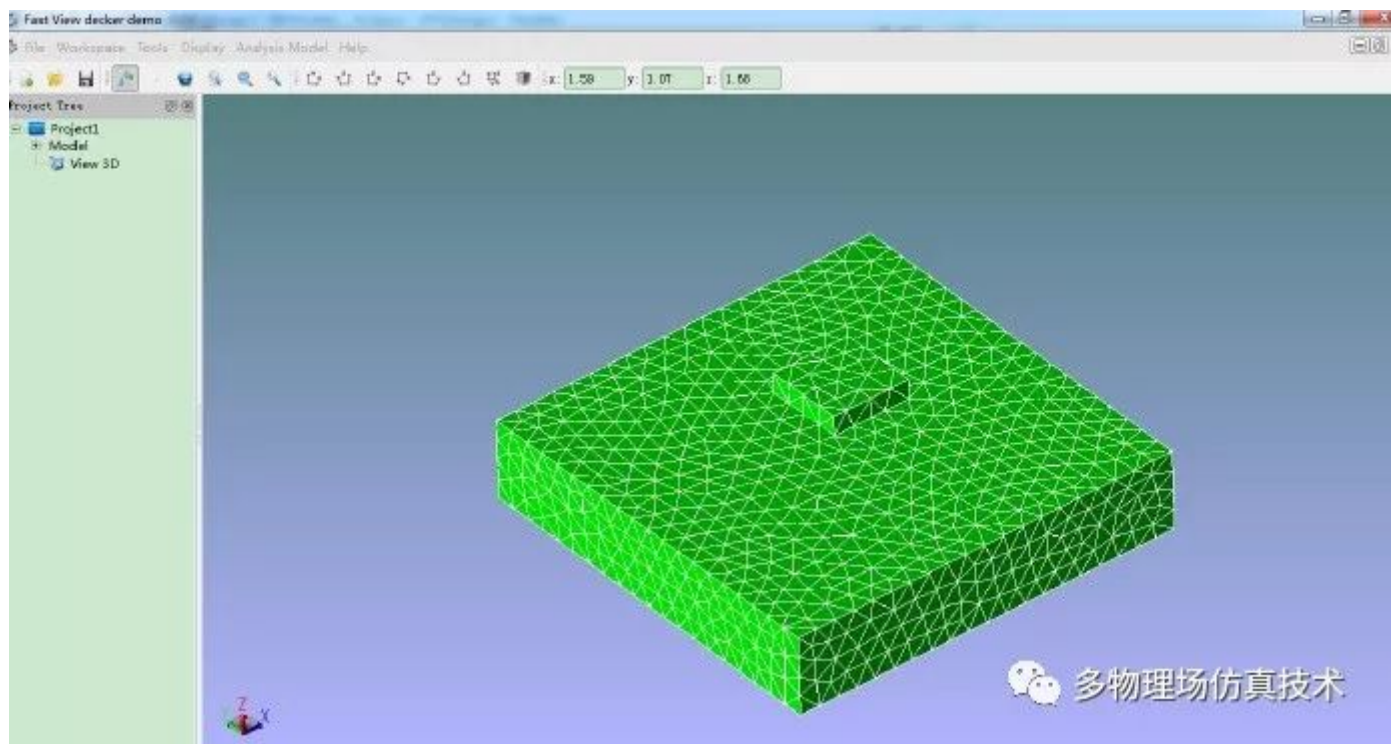


如上图，本来只有2个模型，但是多出4个模型，用来处理接触部分的模型。这也证明了前面的猜想，Ansys支持接触模型不连续的网格，但是在接触部分做了特殊处理。

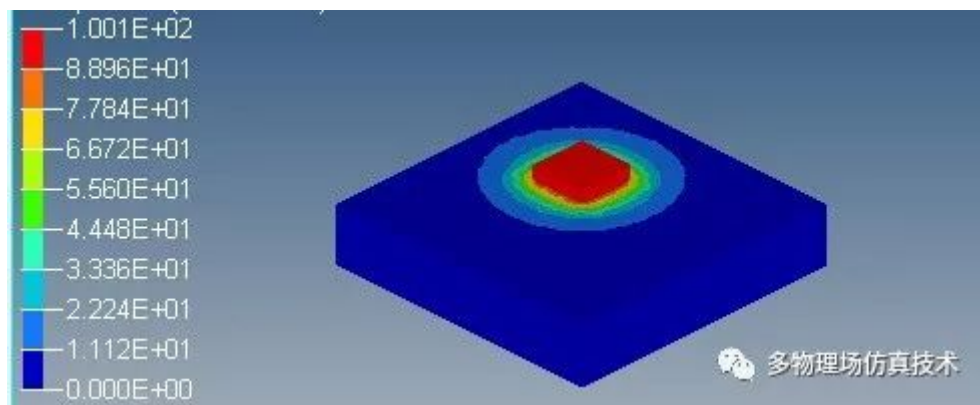
4.1.2. Ansys的计算结果：



4.1.3. 一般来讲，复杂几何的六面体网格比较难划分，市面上提供六面体网格引擎的不多。对三维实体热单元，Ansys中提供了二阶的四面体单元SOLID70。由于Ansys对网格的接触单元做了特殊处理，为了简化模型，FasCAE在前处理器中将两个长方体做为非二维流体处理，划分二阶四面体，Mesh结果如下：



FasCAE计算结果



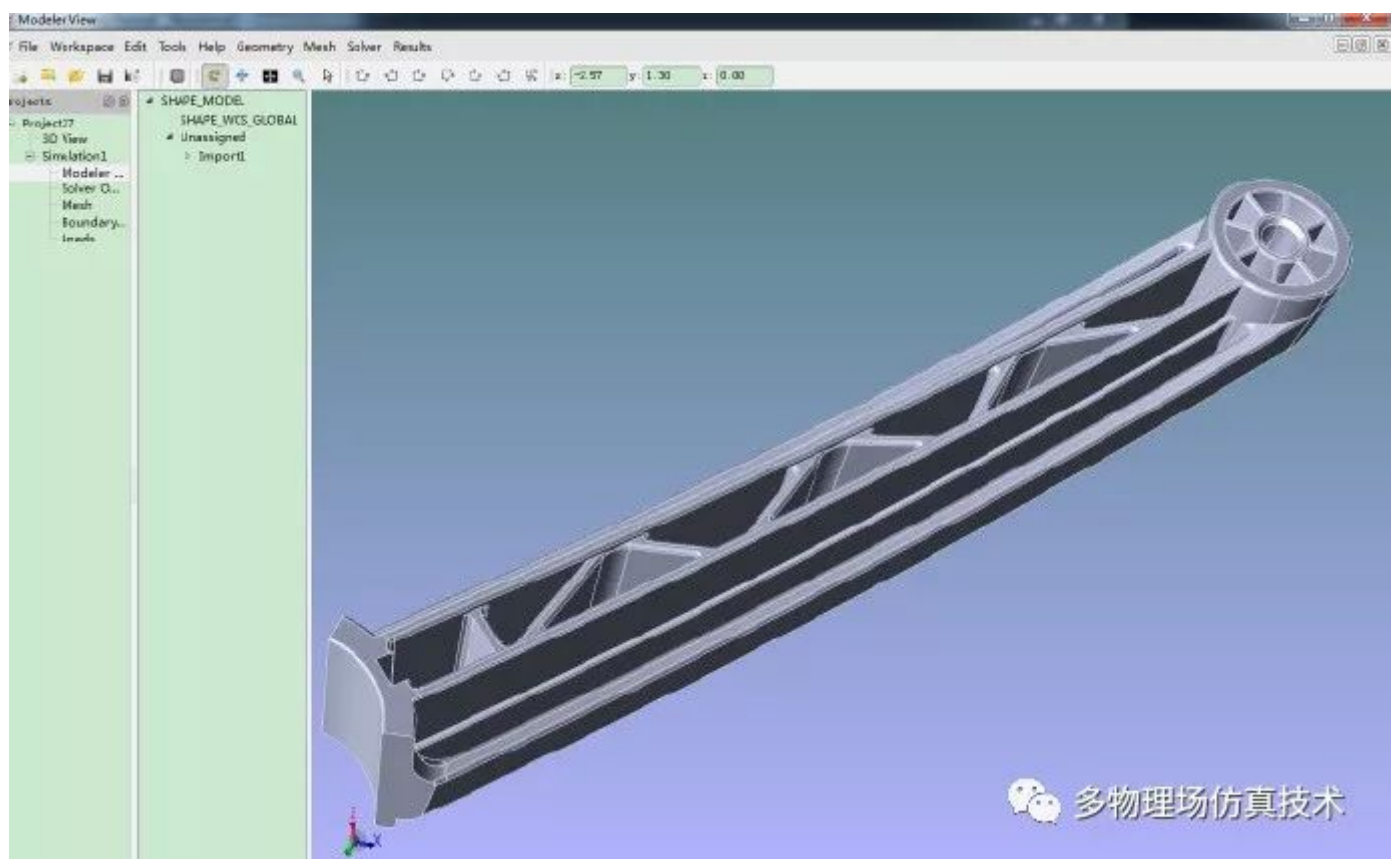
计算结果与Ansys一致，显示不平滑原因一是计算存在少许误差，二是颜色插值造成。

4.1.4. 精度比较

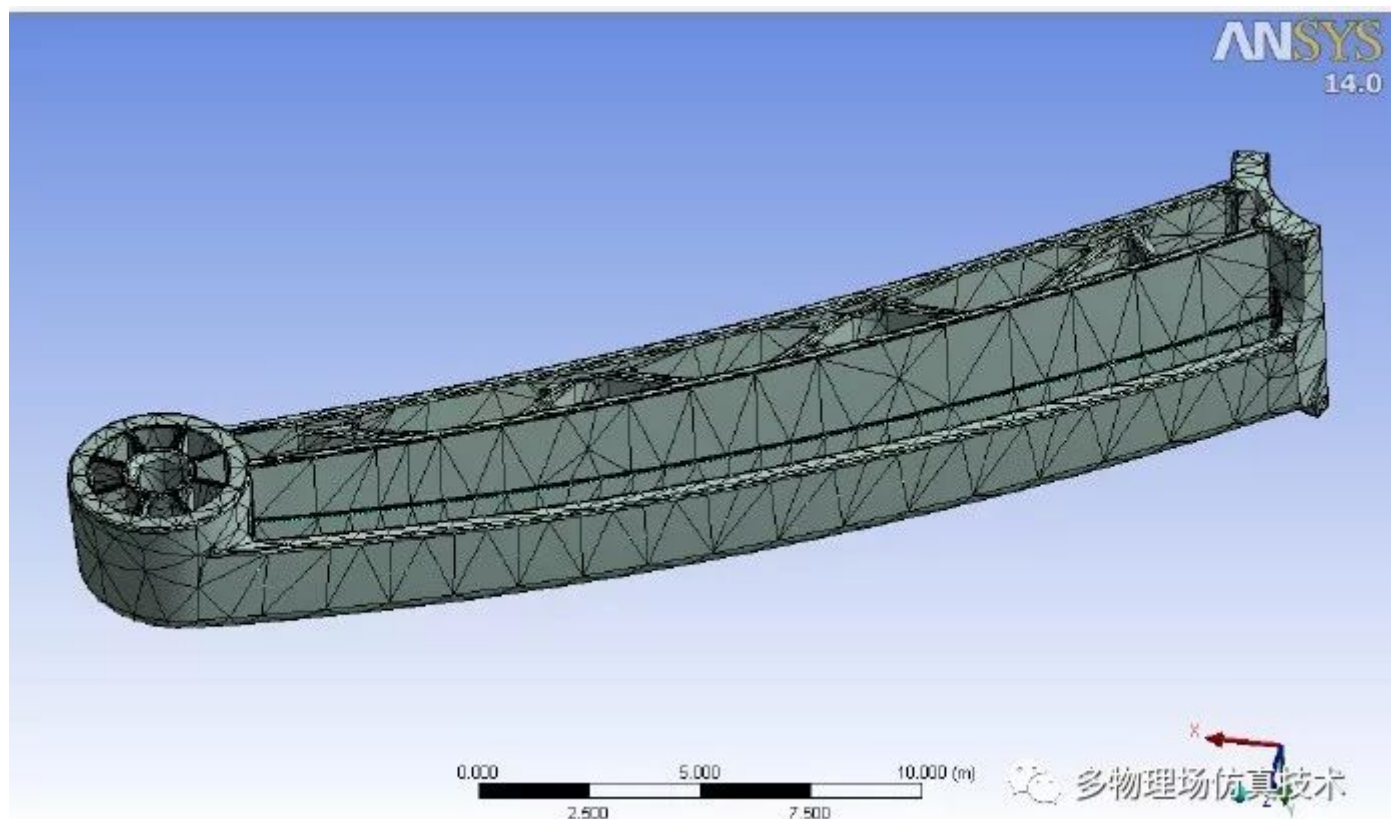
结果的数值比较用Matlab很容易实现，Matlab中读入两者的节点温度数据，排序，利用画图函数和corr2即可得到两者的比较。

4.2. Case5, 复杂几何

为了体现工程应用价值，Case5选用复杂的几何。设置，在两端边界分别设置固定温度0度,200度，中间连接一个面设置温度400度。几何：



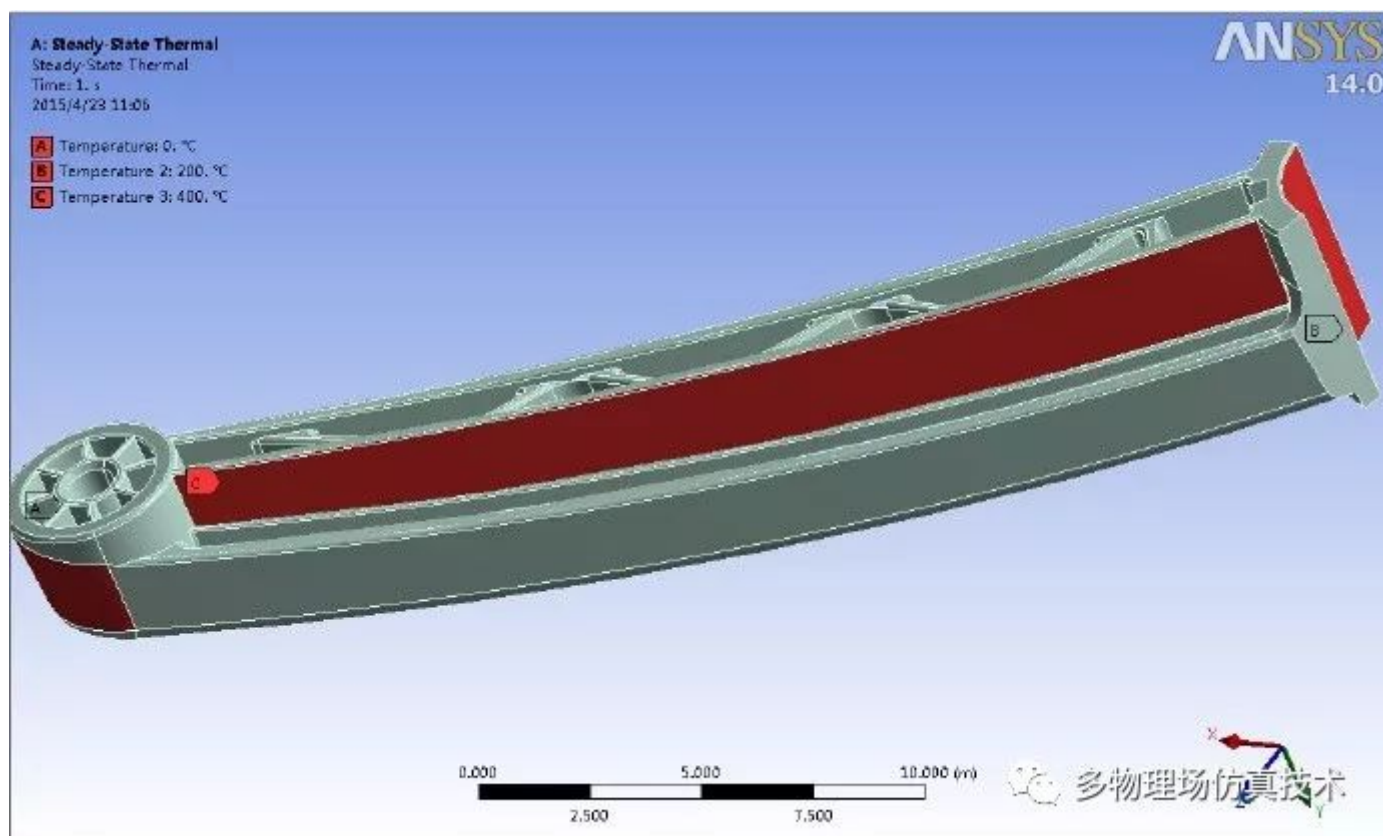
多物理场仿真技术



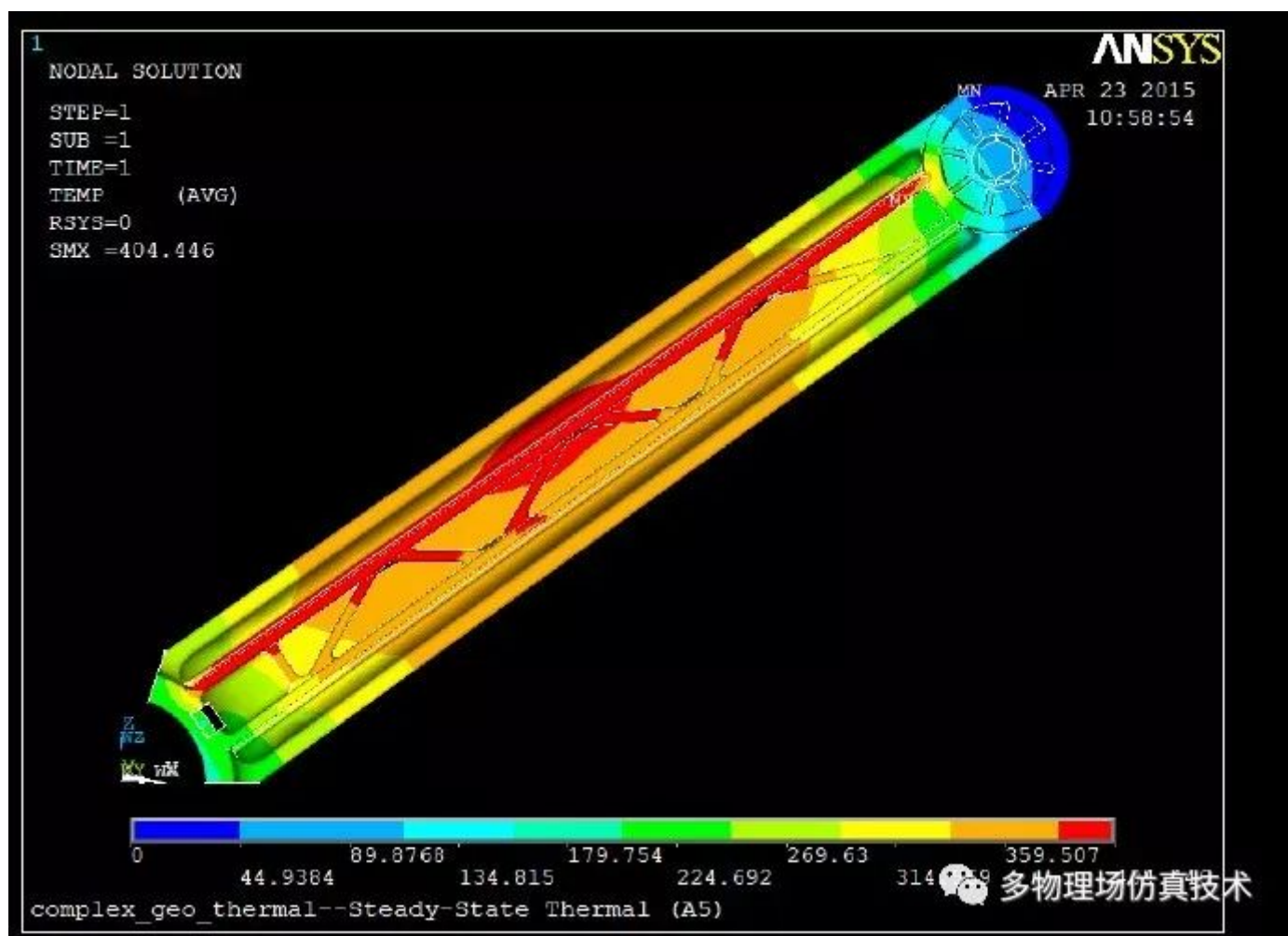
多物理场仿真技术

该几何最大的特点是曲线曲面较多，所以对前处理要求比较高。

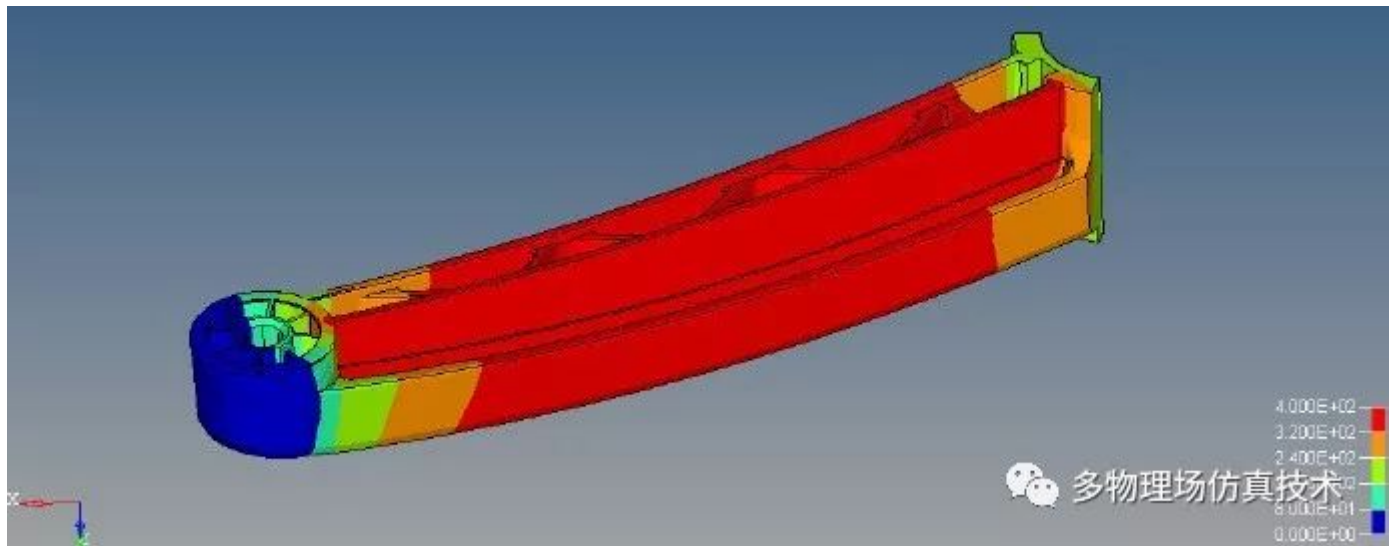
这么复杂的几何，六面体自然是划不出来的，只能用四面体，边界设置：



Ansysis计算结果:



FasCAE计算结果：



颜色区别是插值引起的，后处理器插值可以分的再细一些。