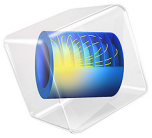
在 COMSOL Multiphysics 6.3 版本中创建



椭圆薄膜的应力分析

本模型基于《COMSOL 软件许可协议》 6.3 版本授权。
所有商标均为其各自所有者的财产。请参见 cn.comsol.com/trademarks。

一般描述

在本基准测试中，执行的是参考资料 1 第 5 页上的 NAFEMS 测试 LE1 “椭圆薄膜”中描述的静态应力分析，这是对线弹性平面应力模型的分析。

本例将计算出的应力水平与基准报告中给出的值进行比较。

除了原始基准测试之外，还执行了网格收敛研究。

几何结构

几何结构为一个椭圆，其中有一个椭圆形的孔。外边和内边由以下方程定义

$$\left(\frac{X}{3.25}\right)^2+\left(\frac{Y}{2.75}\right)^2 = 1$$

$$\left(\frac{X}{2}\right)^2+\left(\frac{Y}{1}\right)^2 = 1$$

厚度 （实际上不影响分析）为 0.1 m。

由于载荷和几何结构的对称性，我们仅分析四分之一个椭圆，如图 1 所示。

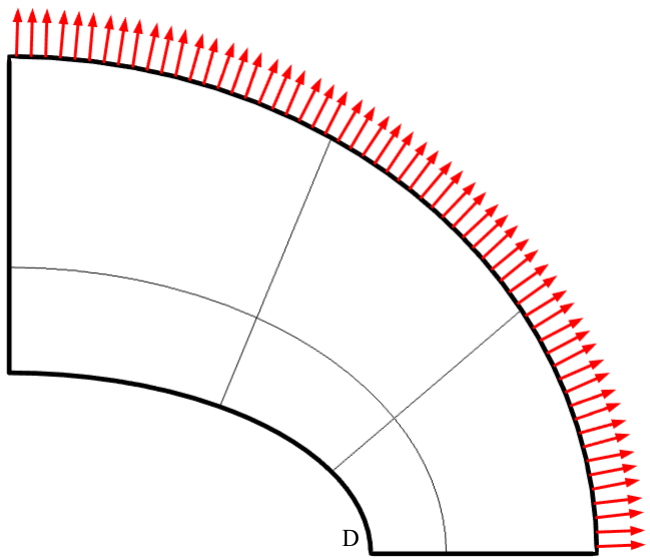


图 1：几何结构和载荷。仅显示所分析的四分之一个椭圆。

材料

各向同性， $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ Pa， $\nu = 0.3$。

载荷

大小为 10 MPa 的均匀分布载荷沿着外边界的向外法向作用。

约束

沿着 $X = 0$ 和 $Y = 0$ 处的切口使用对称条件。

模型建立

使用带有平面应力假设的 “固体力学”接口。

参考资料 1 中明确指定了四个网格。“粗化”网格具有 6 个四边形单元或 12 个三角形单元。“细化”网格具有 24 个四边形单元或 48 个三角形单元。三角形单元是通过沿对角线分割四边形单元来创建的。指定的网格如图 2 和图 3 所示。对于四边形网格，还使用了具有沙漏稳定性的减缩积分方案。

请注意，用于将四边形细分为三角形的算法尝试放置一条对角线，使两个新的三角形尽可能具有最佳的形状。因此，所使用的三角形网格与原始基准中的网格不同，即使单元数量甚至节点位置都相同也是如此。对于非常磁化的网格，这会明显改变应力结果。

对于网格收敛性研究，使用参数 `div` 均匀地细化这些网格。沿椭圆边界的单元数量为 `3*div` 个，沿对称切口的单元数量为 `2*div` 个。

位移自由度数从 48 （div = 1 和具有线性形函数阶次的四边形）到 935810 （div = 64 和具有三次形函数阶次的三角形）不等。

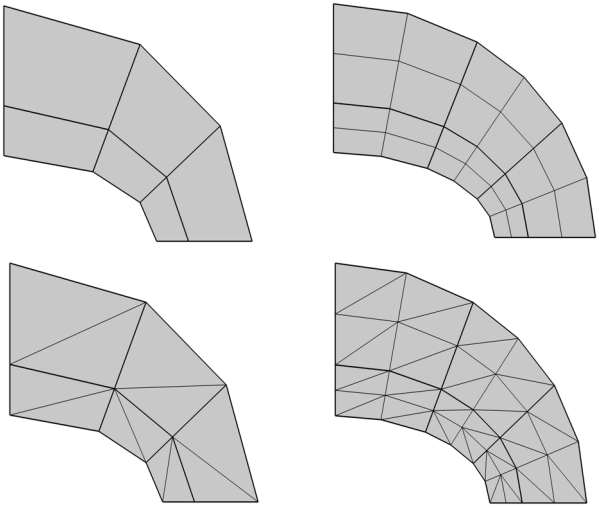


图 2：参考资料 1 中指定的网格。左列：“粗化”网格 (div = 1)。右列：“细化”网格 (div = 2)。

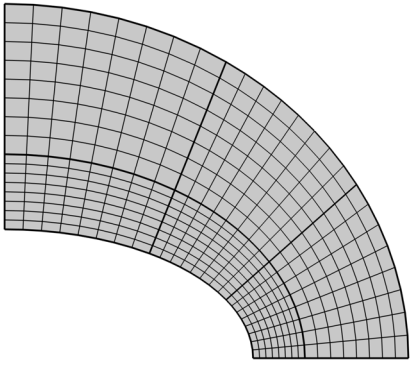


图 3：div = 8 的四边形网格。

由于基准测试的规范，建模过程与您实际使用的有所不同：

- 模型中的内部边界是为了尽可能接近 NAFEMS 基准中网格的规格而创建的。如果您在没有这些约束的情况下求解问题，则建模会大大简化。几何序列中只需要两个椭圆。

- 根据对应力集中区域的了解，您所用的网格应使 D 点周围的区域中存在更多的单元，以获得最佳精度，见图 1。
- 尽可能生成自由三角形网格，而不是通过沿对角线分割四边形单元获得三角形网格，也将获得单元质量更好的网格。

结果与讨论

直接应力在 *Y* 方向的分布如图 4 所示。可以看出，结果在朝向最大值点的方向梯度非常陡峭。

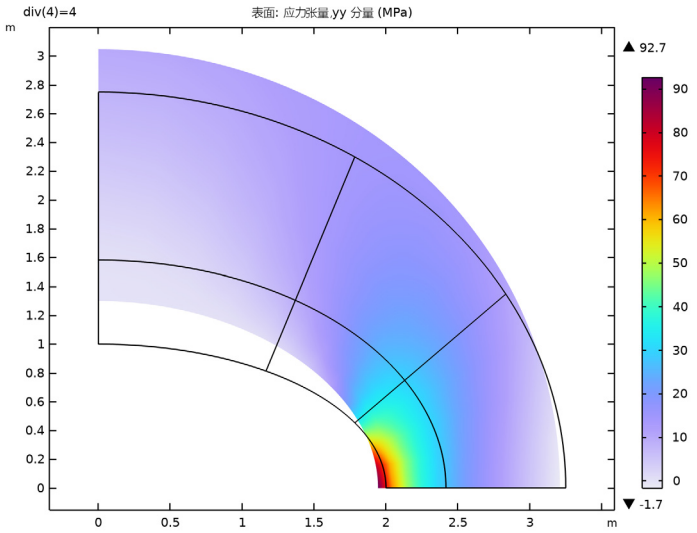


图 4：使用 div = 4 和二阶四边形单元的 σ_y 应力分量的分布。

在位于 $X = 2$， $Y = 0$ 的点 D 处对椭圆孔处的正应力 σ_y 进行计算 （见图 1）。根据参考资料 1，基于解析结果得到的目标值为 92.7 MPa。表格 1 给出了 COMSOL Multiphysics 在 “粗化”和 “细化”网格下得到的结果。

表格 1：基准测试中指定的网格的计算结果。

研究编号	单元类型	离散化	网格	计算值	相对误差
1	四边形	线性	粗化	71.0	-23.3%
1	四边形	线性	细化	85.5	-7.7%
2	四边形	二次	粗化	89.0	-4.0%

研究编号	单元类型	离散化	网格	计算值	相对误差
2	四边形	二次	细化	92.7	0.0%
3	四边形	三次	粗化	93.7	+1.1%
3	四边形	三次	细化	92.5	-0.2%
4	三角形	线性	粗化	33.9	-63.4%
4	三角形	线性	细化	54.1	-41.6%
5	三角形	二次	粗化	74.2	-20.0%
5	三角形	二次	细化	87.7	-5.4%
6	三角形	三次	粗化	86.0	-7.2%
6	三角形	三次	细化	91.8	-0.9%
9	四边形	线性， 降阶	粗化	47.1	-49.2%
10	四边形	线性， 降阶	细化	62.1	-32.9%
11	四边形	二次，降阶	粗化	85.0	-8.3%
12	四边形	二次，降阶	细化	92.2	-0.5%
13	四边形	三次，降阶	粗化	93.5	+1.0%
14	四边形	三次，降阶	细化	92.4	-0.3%

正如所料，除非使用高阶单元，否则粗化网格无法捕获应力集中。通常来说，四边形比相应的三角形表现更好。

标示为“细化”的网格更类似于在对应力集中的高分辨率不感兴趣的情况下，在分析更大的结构时使用的网格。尽管如此，对于二次形函数阶次单元，精度足以满足大多数工程目的。对于当前网格，三角形单元在应力计算点处的角度较小，因此结果不太准确。

在有限元结构分析中，通常避免使用带有线性形函数的单元。

网格收敛研究的结果如图 5 所示。单元大小 h 定义为 `0.417[m]/div`，这是单元中测量应力的边的长度。

参考资料 1 中的目标值 92.7 MPa 仅给出三位有效数字，这对于本例的收敛性研究来说不够精确。相反，误差是相对于值 92.65817 MPa 测得的，而 σ_y 收敛于该值。

收敛特性与预期一致，因为对于形函数阶次较高的单元来说，收敛速度更快。还可以看出，对于二次和三次单元，四边形比三角形更为精确。对于一阶形函数，具有减缩积分规则的四边形单元的性能类似于三角形。对于更高阶的形函数，它们几乎与完全积分的对应单元相当。

由于边界是自由的，因此另外两个面内应力分量 σ_x 和 τ_{xy} 在点 D 处都应为零。图 6 和图 7 显示这些应力分量相似的收敛图。

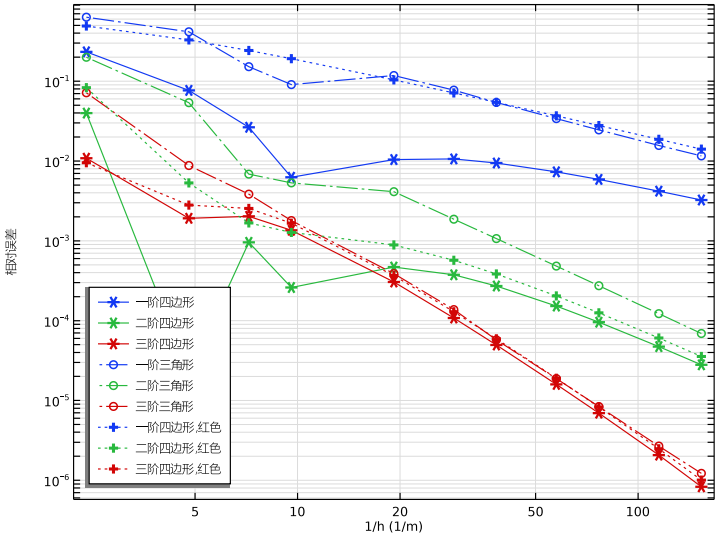


图 5：随单元大小 h 变化的应力目标值的误差。

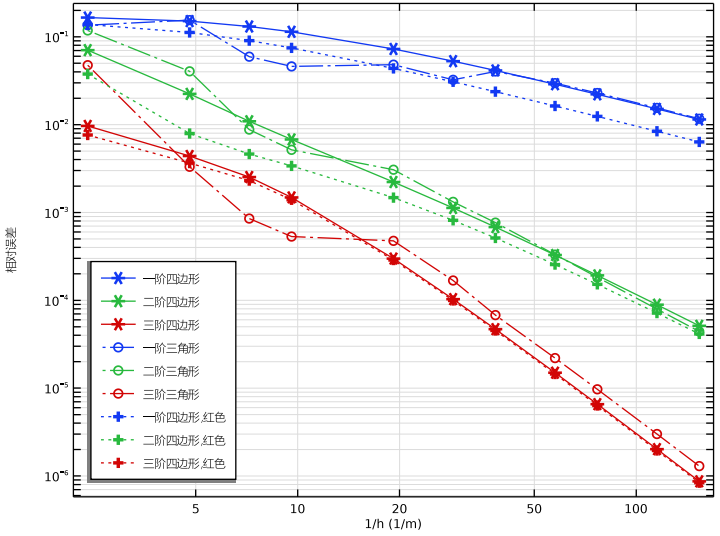


图 6：应力 σ_x 中的误差。以 σ_y 为目标对这些值进行归一化。

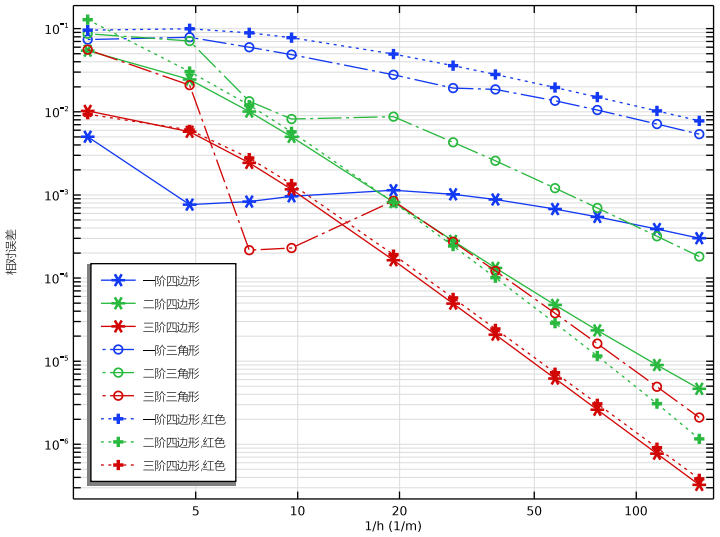


图 7：应力 τ_{xy} 中的误差。以 σ_y 为目标对这些值进行归一化。

由于使用了具有不同形函数阶次的单元，因此为效率起见，仅基于单元大小的比较可能不太合理。模型中大小相同的单元之间的自由度数差异很大，求解时间也是如此。在图 8 中，误差随自由度数变化而变化。同样地，当以这种方式进行比较时，具有三次形函数的单元性能也最好。平滑解通常都是这种情况，但求解非线性问题时情况可能有所不同。

不过，对于更粗的网格 （更具代表性或更贴近实际的网格分辨率），与自由度数相比，二阶四边形单元相当有效。

请注意，当使用减缩积分规则时，使用较少的自由度，这是由于面外位移导数的辅助形函数的低阶产生的。

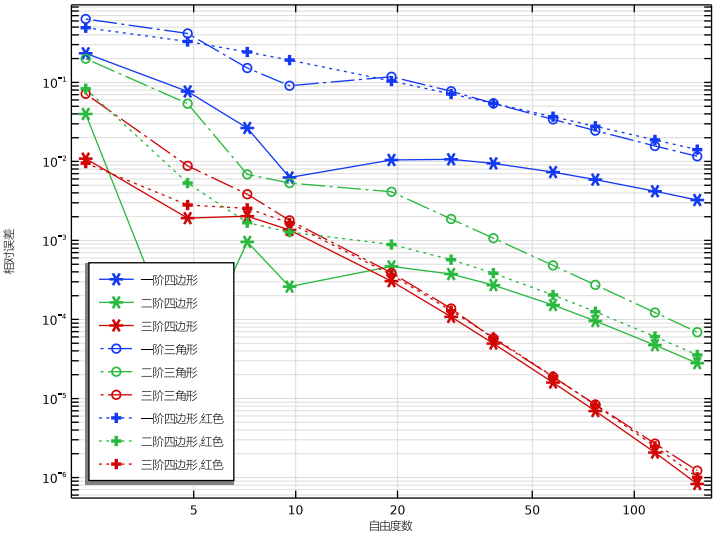


图 8：随自由度数变化的应力目标值的误差。

参考资料

1. G.A.O. Davies, R.T. Fenner, and R.W. Lewis, *Background to Benchmarks*, NAFEMS, Glasgow, 1993.

案例库路径：`Structural_Mechanics_Module/Verification_Examples/elliptic_membrane`

建模操作说明

从**文件**菜单中选择**新建**。

新 建

在**新建**窗口中，单击 **模型向导**。

模型向导

1 在**模型向导**窗口中，单击 **二维**。

2 在**选择物理场**树中选择**结构力学** > **固体力学 (solid)**。

3 单击**添加**。

4 单击 **研究**。

5 在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

6 单击 **完成**。

全局定义

参数 1

1 在**模型开发器**窗口的**全局定义**节点下，单击**参数 1**。

2 在**参数**的**设置**窗口中，定位到**参数**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	值	描述
div	1	1	网格细化因子
sy_ref	92.65817[MPa]	9.2658E7 Pa	目标应力

几何 1

椭圆 1 (e1)

1 在**几何**工具栏中单击 **椭圆**。

2 在**椭圆**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。

3 在**扇形角**文本框中键入 “90”。

4 在 **a 半轴**文本框中键入 “3.25”。

5 在 **b 半轴**文本框中键入 “2.75”。

创建一个额外的网格控制椭圆。

椭圆 2 (e2)

1 在**几何**工具栏中单击 **椭圆**。

2 在**椭圆**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。

3 在 **a 半轴**文本框中键入 “2.417”。

4 在 **b 半轴**文本框中键入 “1.583”。

5 在**扇形角**文本框中键入 “90”。

椭圆 3 (e3)

1 在**几何**工具栏中单击 **椭圆**。

2 在**椭圆**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。

3 在 **a 半轴**文本框中键入 “2”。

差集 1 (dif1)

1 在**几何**工具栏中单击 **布尔操作和分割**，然后选择**差集**。

2 选择 “对象” **e1** 和 **e2**。

3 在**差集**的**设置**窗口中，定位到**差集**栏。

4 单击以选择**要减去的对象**的 **激活选择**切换按钮。

5 选择 “对象” **e3**。

6 单击 **构建所有对象**。

线段 1 (ls1)

1 在**几何**工具栏中单击 **更多体素**，然后选择**线段**。

2 在**线段**的**设置**窗口中，定位到**起点**栏。

3 从**指定**列表中选择**坐标**。

4 定位到**终点**栏。从**指定**列表中选择**坐标**。

5 定位到**起点**栏。在 **x** 文本框中键入 “1.783”，并将 **y** 设为 2.3。

6 定位到**终点**栏。在 **x** 文本框中键入 “1.165”，并将 **y** 设为 0.812。

线段 2 (ls2)

1 在**几何**工具栏中单击 **更多体素**，然后选择**线段**。

2 在**线段**的**设置**窗口中，定位到**起点**栏。

3 从**指定**列表中选择**坐标**。

4 定位到**终点**栏。从**指定**列表中选择**坐标**。

5 定位到**起点**栏。在 **x** 文本框中键入 “2.833”，将 **y** 设为 1.348。

6 定位到**终点**栏。在 **x** 文本框中键入 “1.783”，将 **y** 设为 0.453。

材 料

材料 1 (mat1)

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，右键单击**材料**并选择**空材料**。

2 在**材料**的**设置**窗口中，定位到**材料明细**栏。

3 在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
杨氏模量	E	210E3[MPa]	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	0.3	1	杨氏模量和泊松比
密度	rho	0	kg/m³	基本

固体力学（SOLID）

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**固体力学 (solid)**。

2 在**固体力学**的**设置**窗口中，定位到**二维近似**栏。

3 从列表中选择**平面应力**。

4 定位到**厚度**栏。在 *d* 文本框中键入 “0.1”。

添加第二种材料，可以从全或者降阶积分间进行切换。

线弹性材料 2

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)** 节点下，右键单击**线弹性材料 1** 并选择**复制粘贴**。

线弹性材料 1，降阶积分

1 在**线弹性材料**的**设置**窗口中，定位到**正交设置**栏。

2 选中**减缩积分**复选框。

3 在**标签**文本框中键入 “线弹性材料 1，降阶积分”。

对称 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**对称**。

2 选择 “边界” 1、2、9 和 11。

边界载荷 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**边界载荷**。

2 选择 “边界” 15、18 和 21。

3 在**边界载荷**的**设置**窗口中，定位到**力**栏。

4 从**载荷类型**列表中选择**压力**。

5 在 *p* 文本框中键入 “-10[MPa]”。

网格 1

映射 1

在**网格**工具栏中单击 **映射**。

分布 1

1 右键单击**映射 1** 并选择**分布**。

2 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。

3 在**单元数**文本框中键入 “div”。

4 选择 “边界” 1、 2、 13、 16 和 19。

5 单击 **全部构建**。

位移场的默认离散化由二次巧凑边点形函数构成。更改为拉格朗日形函数。

固体力学 (SOLID)

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**固体力学 (solid)**。

2 在**固体力学**的**设置**窗口中，单击以展开**离散化**栏。

3 从**位移场**列表中选择**二次拉格朗日单元**。

同样也添加线性和三次位移场。离散化类型的实际选择将在每项研究中完成。

4 在**模型开发器**工具栏中单击 **显示更多选项**按钮。

5 在**显示更多选项**对话框中，在树中，选中**物理场 > 高级物理场选项**节点的复选框。

6 单击**确定**。

线性离散

1 在**物理场**工具栏中单击 **全局**，然后选择**离散化**。

2 在**离散化**的**设置**窗口中，定位到**离散化**栏。

3 从**位移场**列表中选择**线性**。

4 在**标签**文本框中键入 “线性离散”。

三阶离散

1 右键单击**线性离散**并选择**复制粘贴**。

2 在**离散化**的**设置**窗口中，定位到**离散化**栏。

3 从**位移场**列表中选择**三次拉格朗日单元**。

4 在**标签**文本框中键入 “三阶离散”。

四边形线性单元研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 1**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “四边形线性单元研究”。

参数化扫描

1 在**研究**工具栏中单击 **参数化扫描**。

2 在**参数化扫描**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 单击 **添加**。

4 在表中输入以下设置：

参数名称	参数值列表	参数单位
div (网格细化因子)	1 2 3 4 8 12 16 24 32 48 64	

步骤 1：稳态

1 在**模型开发器**窗口中，单击**步骤 1： 稳态**。

2 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

3 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

4 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)**。

5 从**离散化**列表中选择**线性离散**。

根节点

为其他离散化和单元形状添加另外 8 个研究。从第一个研究中复制参数值。

添加研究

1 在**研究**工具栏中，单击 **添加研究**以打开**添加研究**窗口。

2 转到**添加研究**窗口。

3 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

4 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

四边形线性单元研究

参数化扫描

在**模型开发器**窗口的**四边形线性单元研究**节点下，右键单击**参数化扫描**并选择**复制**。

四边形二次单元研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 2**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “四边形二次单元研究”。

3 右键单击**四边形二次单元研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

添加研究

1 转到**添加研究**窗口。

2 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

3 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

4 在**主屏幕**工具栏中，单击**添加研究**以关闭**添加研究**窗口。

四边形三次单元研究

1 在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “四边形三次单元研究”。

2 右键单击**四边形三次单元研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

步骤 1：稳态

1 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

2 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

3 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)**。

4 从**离散化**列表中选择**三阶离散**。

网格 1

创建三角形网格。此网格案例将是从现在开始创建的新研究的默认网格。

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，右键单击**网格 1** 并选择**复制粘贴**。

三角形网格

在**网格**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “三角形网格”。

转换 1

在**网格**工具栏中单击**修改**，然后选择**转换**。

添加研究

1 在**主屏幕**工具栏中，单击**添加研究**以打开**添加研究**窗口。

2 转到**添加研究**窗口。

3 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

4 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

三角形线性单元研究

在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “三角形线性单元研究”。

参数化扫描

右键单击**三角形线性单元研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

步骤 1：稳态

1 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

2 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

3 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)**。

4 从**离散化**列表中选择**线性离散**。

5 清除**修改研究步骤的模型配置**复选框。

添加研究

1 转到**添加研究**窗口。

2 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

3 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

三角形二次单元研究

在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “三角形二次单元研究”。

参数化扫描

右键单击**三角形二次单元研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

添加研究

1 转到**添加研究**窗口。

2 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

3 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

三角形三次单元研究

1 在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “三角形三次单元研究”。

2 右键单击**三角形三次单元研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

步骤 1：稳态

1 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

2 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

3 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)**。

4 从**离散化**列表中选择**三阶离散**。

添加研究

1 转到**添加研究**窗口。

2 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

3 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

四边形线性单元研究

参数化扫描

在**模型开发器**窗口的**四边形线性单元研究**节点下，右键单击**参数化扫描**并选择**复制**。

四边形线性单元降阶研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 7**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “四边形线性单元降阶研究”。

3 右键单击**四边形线性单元降阶研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

步骤 1：稳态

1 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

2 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

3 在模型树中选择**组件 1 (comp1) > 固体力学 (solid) > 线弹性材料 2**。

4 右键单击并选择**禁用**。

5 在模型树中选择**组件 1 (comp1) > 固体力学 (solid)**。

6 从**离散化**列表中选择**线性离散**。

7 单击以展开**网格选择**栏。在表中输入以下设置：

组件	网格
组件 1	网格 1

添加研究

1 转到**添加研究**窗口。

2 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究 > 稳态**。

3 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

四边形线性单元研究

参数化扫描

在**模型开发器**窗口的**四边形线性单元研究**节点下，右键单击**参数化扫描**并选择**复制**。

四边形四阶单元降阶研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 8**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “四边形四阶单元降阶研究”。

3 右键单击**四边形四阶单元降阶研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

步骤 1：稳态

1 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

2 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

3 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)** > **线弹性材料 2**。

4 右键单击并选择**禁用**。

5 定位到**网格选择**栏。在表中输入以下设置：

组件	网格
组件 1	网格 1

添加研究

1 转到**添加研究**窗口。

2 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **稳态**。

3 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

4 在**研究**工具栏中，单击 **添加研究**以关闭**添加研究**窗口。

四边形线性单元研究

参数化扫描

在**模型开发器**窗口的**四边形线性单元研究**节点下，右键单击**参数化扫描**并选择**复制**。

四边形三阶单元降阶研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 9**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “四边形三阶单元降阶研究”。

3 右键单击**四边形三阶单元降阶研究**并选择**粘贴参数化扫描**。

步骤 1：稳态

1 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。

2 选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

3 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)** > **线弹性材料 2**。

4 右键单击并选择**禁用**。

5 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)**。

6 从**离散化**列表中选择**三阶离散**。

7 定位到**网格选择**栏。在表中输入以下设置：

组件	网格
组件 1	网格 1

四边形线性单元研究

在**研究**工具栏中单击 = **计算**。

四边形二次单元研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**四边形二次单元研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 = **计算**。

四边形三次单元研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**四边形三次单元研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 = **计算**。

三角形线性单元研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**三角形线性单元研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 = **计算**。

三角形二次单元研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**三角形二次单元研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 = **计算**。

三角形三次单元研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**三角形三次单元研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

四边形线性单元降阶研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**四边形线性单元降阶研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

四边形四阶单元降阶研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**四边形四阶单元降阶研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

四边形三阶单元降阶研究

1 在**模型开发器**窗口中，单击**四边形三阶单元降阶研究**。

2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 清除**生成默认绘图**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

结果

首选单位 1

1 在**结果**工具栏中单击 **配置**，然后选择**首选单位**。

2 在**首选单位**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。

3 单击 **添加物理量**。

4 在**物理量**对话框中，选择模型树中的**固体力学 > 应力张量 (N/m^2)**。

5 单击**确定**。

6 在**首选单位**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。

7 在表中输入以下设置：

物理量	单位	首选单位
应力张量	N/m^2	MPa

8 单击 **应用**。

D 处的网格收敛 sy

1 在**结果**工具栏中单击 **一维绘图组**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “D 处的网格收敛 sy”。

点结果图 1

1 右键单击 **D 处的网格收敛 sy** 并选择**点结果图**。

2 选择 “点” 11。

3 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

4 从**数据集**列表中选择**四边形线性单元研究 / 参数化解 1 (sol2)**。

5 定位到 **y 轴数据**栏。在**表达式**文本框中键入 “abs(solid.sGpy/sy_ref-1)”。

6 定位到 **x 轴数据**栏。从**参数**列表中选择**表达式**。

7 在**表达式**文本框中键入 “div/0.417”。

8 单击以展开**着色和样式**栏。找到**线标记**子栏。从**标记**列表中选择**星号**。

9 单击以展开**图例**栏。选中**显示图例**复选框。

10 从**图例**列表中选择**手动**。

11 在表中输入以下设置：

图例
一阶四边形

点结果图 2

1 右键单击**点结果图 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形二次单元研究 / 参数化解 2 (sol15)**。

4 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
二阶四边形

点结果图 3

1 右键单击**点结果图 2** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形三次单元研究 / 参数化解 3 (sol28)**。

4 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
三阶四边形

点结果图 4

1 右键单击**点结果图 3** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三角形线性单元研究 / 参数化解 4 (sol41)**。

4 定位到**着色和样式**栏。找到**线样式**子栏。从**线**列表中选择**点划线**。

5 从**颜色**列表中选择**循环 （重置）**。

6 找到**线标记**子栏。从**标记**列表中选择**圆**。

7 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
一阶三角形

点结果图 5

1 右键单击**点结果图 4** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三角形二次单元研究 / 参数化解 5 (sol54)**。

4 定位到**着色和样式**栏。从**颜色**列表中选择**循环**。

5 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
二阶三角形

点结果图 6

1 右键单击**点结果图 5** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三角形三次单元研究 / 参数化解 6 (sol67)**。

4 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
三阶三角形

点结果图 7

1 右键单击**点结果图 6** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形线性单元降阶研究 / 参数化解 7 (sol80)**。

4 定位到**着色和样式**栏。找到**线样式**子栏。从**线**列表中选择**点虚线**。

5 从**颜色**列表中选择**循环 （重置）**。

6 找到**线标记**子栏。从**标记**列表中选择**加号**。

7 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
一阶四边形，红色

点结果图 8

1 右键单击**点结果图 7** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形四阶单元降阶研究 / 参数化解 8 (sol93)**。

4 定位到**着色和样式**栏。从**颜色**列表中选择**循环**。

5 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
二阶四边形，红色

点结果图 9

1 右键单击**点结果图 8** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形三阶单元降阶研究 / 参数化解 9 (sol106)**。

4 定位到**图例**栏。在表中输入以下设置：

图例
三阶四边形，红色

D 处的网格收敛 sy

1 在**模型开发器**窗口中，单击 **D 处的网格收敛 sy**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**绘图设置**栏。

3 选中 **x 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “1/h (1/m)”。

4 选中 **y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “相对误差”。

5 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

6 定位到**轴**栏。选中 **x 轴对数刻度**复选框。

7 选中 **y 轴对数刻度**复选框。

8 定位到**图例**栏。从**位置**列表中选择**左下角**。

9 在 **D 处的网格收敛 sy** 工具栏中单击 **绘制**。

D 处的网格收敛 sx

1 右键单击 **D 处的网格收敛 sy** 并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “D 处的网格收敛 sx”。

查找和替换

1 按 Ctrl+F。

2 转到**查找和替换**窗口。

3 在**包含**文本框中键入 “abs(solid.sGpy/sy_ref-1)”。

4 在**替换为**文本框中键入 “abs(solid.sGpx/sy_ref)”。

5 单击 **添加过滤器**旁边的 ，然后选择**节点过滤器**。

6 在**节点过滤器**对话框中，在**查找**文本框中键入 “sx”。

7 单击**确定**。

8 转到**查找和替换**窗口。

9 单击 **搜索**。

10 单击 **替换**旁边的 ，然后选择**全部替换**。

结果

点结果图 1

1 在**模型开发器**窗口的**结果** > **D 处的网格收敛 sx** 节点下，单击**点结果图 1**。

2 在 **D 处的网格收敛 sx** 工具栏中单击 **绘制**。

D 处的网格收敛 sxy

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击 **D 处的网格收敛 sx** 并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “D 处的网格收敛 sxy”。

查找和替换

1 按 Ctrl+F。

2 转到**查找和替换**窗口。

3 在**包含**文本框中键入 “abs(solid.sGpx/sy_ref)”。

4 在**替换为**文本框中键入 “`abs(solid.sGpxy/sy_ref)`”。

5 单击 **添加过滤器**旁边的 ，然后选择**节点过滤器**。

6 在**节点过滤器**对话框中，在**查找**文本框中键入 “`sxy`”。

7 单击**确定**。

8 转到**查找和替换**窗口。

9 单击 **搜索**。

10 单击 **替换**旁边的 ，然后选择**全部替换**。

结果

点结果图 1

1 在**模型开发器**窗口的**结果 > D 处的网格收敛 sxy** 节点下，单击**点结果图 1**。

2 在 **D 处的网格收敛 sxy** 工具栏中单击 **绘制**。

D 处的网格收敛 sy（通过自由度）

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击 **D 处的网格收敛 sy** 并选择**复制粘贴**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “`D 处的网格收敛 sy（通过自由度）`”。

查找和替换

1 按 Ctrl+F。

2 转到**查找和替换**窗口。

3 在**包含**文本框中键入 “`div/0.417`”。

4 在**替换为**文本框中键入 “`numberofdofs`”。

5 单击 **添加过滤器**旁边的 ，然后选择**节点过滤器**。

6 在**节点过滤器**对话框中，在**查找**文本框中键入 “`by DOFs`”。

7 单击**确定**。

8 转到**查找和替换**窗口。

9 单击 **搜索**。

10 单击 **替换**旁边的 ，然后选择**全部替换**。

结果

D 处的网格收敛 sy（通过自由度）

1 在**模型开发器**窗口中展开 **D 处的网格收敛 sy（通过自由度）**节点，然后单击**结果 > D 处的网格收敛 sy（通过自由度）**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**绘图设置**栏。

3 在 **x 轴标签**文本框中键入 “自由度数”。

4 在 **D 处的网格收敛 sy （通过自由度）**工具栏中单击 **绘制**。

计算组 1

1 在**结果**工具栏中单击 **计算组**。

2 在**计算组**的**设置**窗口中，定位到**变换**栏。

3 选中**转置**复选框。

点计算 1

1 右键单击**计算组 1** 并选择**点计算**。

2 选择 “点” 11。

3 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

4 从**数据集**列表中选择**四边形线性单元研究 / 参数化解 1 (sol2)**。

5 从**参数选择 (div)** 列表中选择**来自列表**。

6 从**参数值 (div)** 列表中选择 **1** 和 **2**。

7 单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学** > **应力** > **应力张量 （空间坐标系） - N/m²** > **solid.sGpyy - 应力张量， yy 分量**。

8 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，四边形线性单元
(solid.sGpyy-sy_ref)/sy_ref	%	

点计算 2

1 右键单击**点计算 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形二次单元研究 / 参数化解 2 (sol15)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，四边形二次单元

点计算 3

1 右键单击**点计算 2** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形三次单元研究 / 参数化解 3 (sol28)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，四边形三次单元

点计算 4

1 右键单击**点计算 3** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三角形线性单元研究 / 参数化解 4 (sol41)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，三角形线性单元

点计算 5

1 右键单击**点计算 4** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三角形二次单元研究 / 参数化解 5 (sol54)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，三角形二次单元

点计算 6

1 右键单击**点计算 5** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三角形三次单元研究 / 参数化解 6 (sol67)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，三角形三次单元

点计算 7

1 右键单击**点计算 6** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形线性单元降阶研究 / 参数化解 7 (sol80)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，四边形线性单元，红色

点计算 8

1 右键单击**点计算 7** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形四阶单元降阶研究 / 参数化解 8 (sol93)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，四边形四次单元，红色

点计算 9

1 右键单击**点计算 8** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形三阶单元降阶研究 / 参数化解 9 (sol106)**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.sGpyy	MPa	应力，四边形三次单元，红色

5 在**计算组 1** 工具栏中单击 **计算**。

应力 (solid)

1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**应力 (solid)**。

2 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**四边形二次单元研究 / 参数化解 2 (sol15)**。

4 从**参数值 (div)** 列表中选择 **4**。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**应力 (solid)** 节点，然后单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**组件 1 (comp1) > 固体力学 > 应力 > 应力张量 （空间坐标系） - N/m² > solid.sGpyy - 应力张量，yy 分量**。

3 在**应力 (solid)** 工具栏中单击 **绘制**。

应力 (solid)

1 在**模型开发器**窗口中，单击**应力 (solid)**。

2 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**颜色图例**栏。

3 选中**显示最大值和最小值**复选框。

4 在**图形**工具栏中单击  **缩放到窗口大小**按钮。