

第 5 章 结构静力学分析与实例

结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。结构是一个广义的概念，包括土木工程结构，如建筑物；航空结构，如飞机机身；汽车结构，如车身骨架；海洋结构，如船舶结构等。此外还包括各种机械零部件，如活塞、传动轴等。本章介绍 ABAQUS 用于结构静力学分析的方法和步骤，通过本章的学习，让读者进一步熟悉前面章节介绍的各模块功能，了解 ABAQUS 的强大功能。

5.1 线性静态结构分析概述

结构线性静力学分析计算是结构在不变的静载荷作用下的受力分析。它不考虑惯性和阻尼的影响。静力学分析的载荷可以是不变的惯性载荷（如离心力和重力），以及通常在许多建筑规范值所定义的等价静力风载和地震载荷等（可近似等价于静力作用随时间变化）的作用。

5.1.1 静力学分析的基本概念

静力学分析是计算在固定不变载荷作用下结构的响应，它不考虑惯性和阻尼影响。可是，静力学分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷（如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风载和地震载荷）的作用。

静力学分析用于计算由不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定，即假定载荷和结构响应随时间的变化非常缓慢。静力学分析所施加的载荷包括：外部施加的作用力和压力、稳态的惯性力（如重力和离心力）、强迫位移、温度载荷（对于温度应变）及能流（对于核能膨胀）等。

5.1.2 结构静力学分析的特点

静力学分析的结果包括位移、应力、应变和力等。静力学分析所施加的载荷包括以下几个方面。

- 外部施加的作用力和压力。
- 稳态的惯性力（如重力和离心力）。
- 温度载荷（对于温度应变）。
- 强制位移。
- 能流（对于核能膨胀）。

静力学分析既可以是线性的也可以是非线性的。非线性静力学分析包括所有类型的非线性，如大变形、塑性、蠕变、应力刚化、接触（间隙）单元、超单元等。本章主要讨论线性静力学分析，对于非线性分析详见后续相关章节。

5.1.3 结构静力学分析的方法

线性静力学问题是简单且常见的有限元分析类型，不涉及任何非线性分析（材料非线性、

几何非线性及接触等)，也不考虑惯性及与时间相关的材料属性。在 ABAQUS 中，该类问题通常采用静态分析步或静态线性摄动分析步进行分析。

线性静力学问题很容易求解，因此用户往往更关心的是计算精度和求解效率：希望在获得较高精度的前提下尽量缩短计算时间，特别是大型模型。计算精度和求解效率的高低主要取决于网格的划分，包括种子的设置、网格控制和单元类型的选取。应尽量选用精度和效率都较高的二次四边形/六面体单元，在主要的分析部位设置较密的种子；若主要分析部位的网格没有大的扭曲，使用非协调单元（如 CPS4I、C3D8I）效果较好。对于复杂模型，可以用精度较高的二次三角形/四面体单元进行网格划分。

5.1.4 结构静力学分析的步骤及要求

1. 结构静力学分析的基本步骤

- (1) 建立几何模型。
- (2) 定义材料属性。
- (3) 进行模型装配。
- (4) 定义分析步。
- (5) 施加边界条件和载荷。
- (6) 定义作业，求解。
- (7) 结果分析。

2. 静力学分析的主要要求

- (1) 采用线性结构单元。
- (2) 对于网格密度需要注意：应力和应变急剧变化的局域，通常也是用户感兴趣的区域，需要有比较密的网格。当考虑非线性效应的时候，要用足够的网格来得到非线性效应。在静力学分析中，分析步必须为一般静力学分析步，即 General Static。
- (3) 材料可以是线性或者非线性的、各向异性或者正交各向同性的、常数或者跟温度相关的。

5.2 线性静力学分析实例

本节详细介绍对一个固定的轴承座进行静力学分析的全过程。

1. 创建模型

模型如图 5-1 所示。可以通过 ABAQUS 自带的 Part 模块进行草图编辑建模，也可以通过导入 Step 格式文件进行建模。

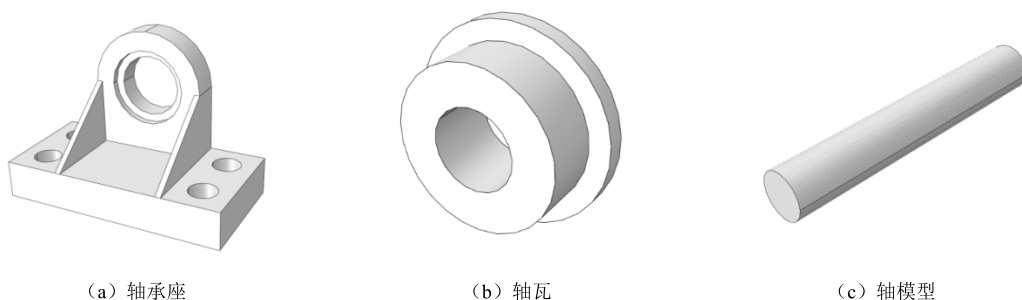


图 5-1 轴承座、轴瓦、轴模型图

2. 属性设置

(1) 单击  Create Material (创建材料) 按钮, 新建一个材料, 定义为“Steel”, 选择 Material Behaviors (材料行为) 中的 Elastic (弹性), 如图 5-2 所示。

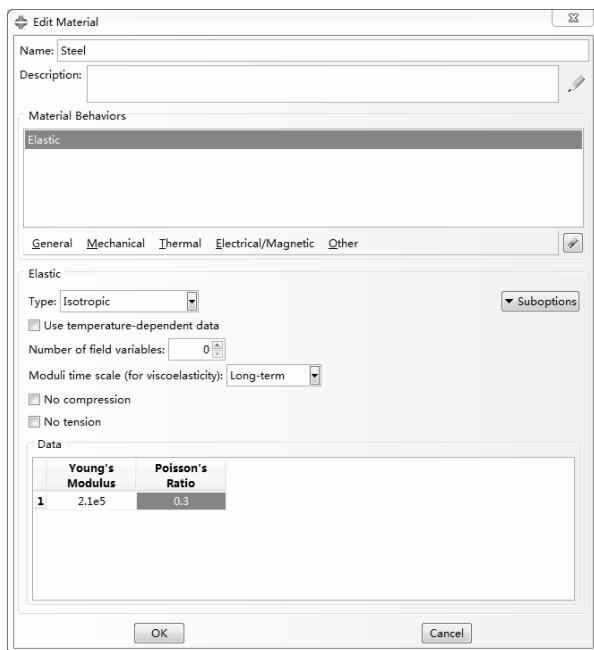


图 5-2 “编辑材料”对话框

(2) 单击  Create Section (创建截面) 按钮, 弹出图 5-3 所示的“Create Section (创建截面)”对话框, 在 Name (名字) 文本框中输入 SolidSteel, 在其下进行设置, 单击 Continue...按钮, 弹出 Edit Section (编辑截面) 对话框, 如图 5-4 所示, 在其中进行选择, 最后单击 OK 按钮。

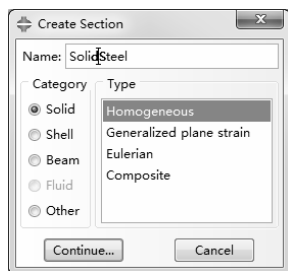


图 5-3 “创建截面”对话框

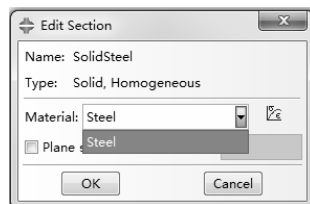


图 5-4 “编辑截面”对话框

(3) 单击  Assign Section (截面指派) 按钮, 对模型进行截面指派。单击  按钮后, 在视图中选取需要指派截面的模型, 完成后单击鼠标中键, 弹出图 5-5 所示的 Edit Section Assignment (编辑截面指派) 对话框。同样的操作分别对轴承座、轴瓦和轴进行截面指派, 效果如图 5-6~图 5-8 所示。

3. 装配

(1) 进入 (Assembly) 装配模块, 单击  Create Instance (创建实体) 按钮, 进入图 5-9 所示的 Create Instance (创建实例) 对话框, 依次选择 3 个部件, 点选 Dependent (mesh on part) 单选按钮, 即非独立 (网格在零件上), 单击 OK 按钮后, 完成各部件的实例化, 效果如图 5-10 所示。

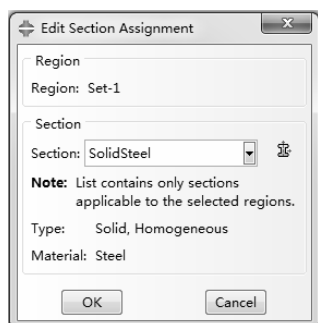


图 5-5 “编辑截面指派”对话框

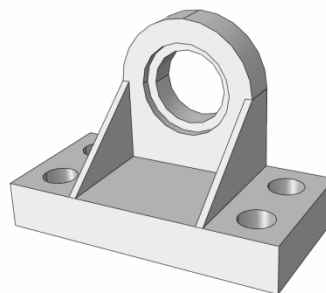


图 5-6 完成轴承座截面指派

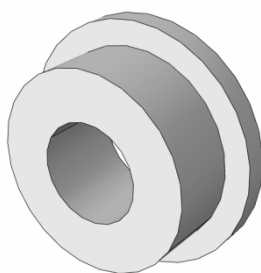


图 5-7 完成轴瓦的截面指派

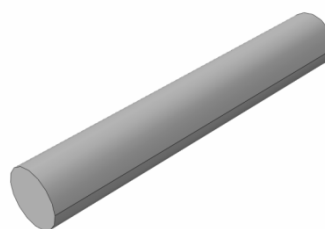


图 5-8 完成轴的截面指派

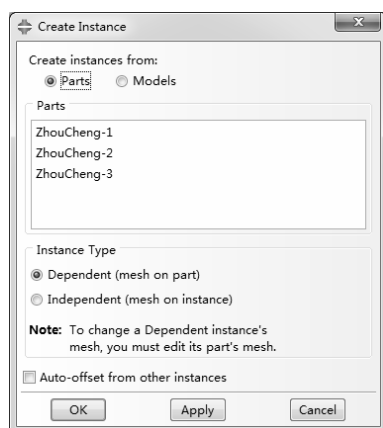


图 5-9 “创建实例”对话框

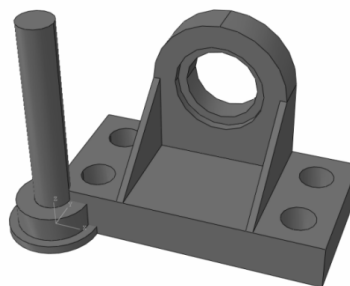


图 5-10 部件实例化

(2) 在实例化完成后进行实例位置关系的定义。单击 Create Constraint: (创建约束: 共轴) 按钮和 Translate To (平移到) 按钮, 分别进行相合接触圆周面的同轴约束和接触平面约束。约束完成后效果如图 5-11 所示。

4. 设置分析步与输出请求

(1) 单击 Create Step (创建分析步) 按钮, 弹出如图 5-12 所示的 Create Step (创建分析步) 对话框, 定义分析步名称并选择分析类型, 在此选择 Static, General (通用静力学) 分析步, 单击 Continue...按钮, 弹出图 5-13 所示的 Edit Step (编辑分析步) 对话框。

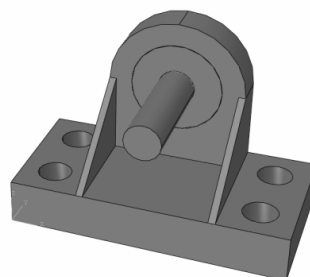


图 5-11 完成实例约束

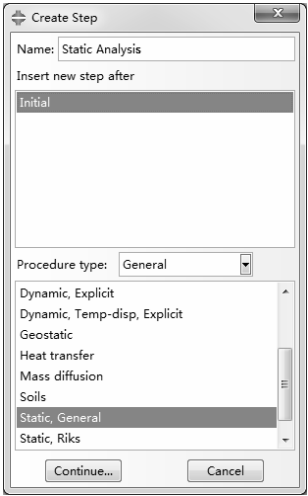


图 5-12 “创建分析步”对话框

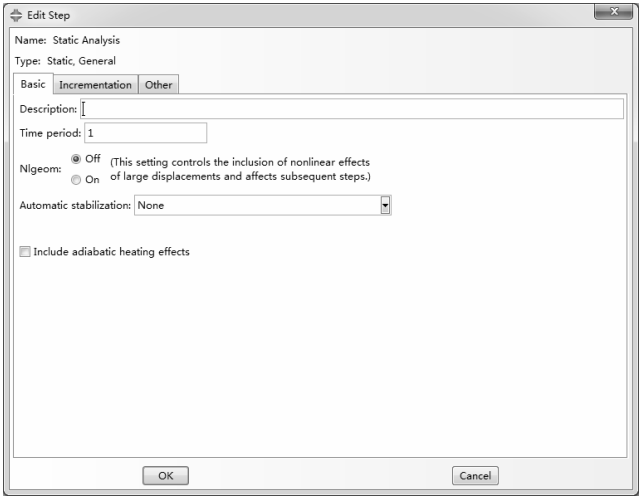


图 5-13 “编辑分析步”对话框

(2) 单击  Field Output Manager (场输出管理器) 按钮, 弹出 Field Output Requests Manager (场输出请求管理器) 对话框, 如图 5-14 所示, 选择 Edit... 按钮, 弹出如图 5-15 所示的 Edit Field Output Request (编辑场输出请求) 对话框, 选择输出 Stresses (应力) 和 Strains (应变), 如图 5-16 所示。

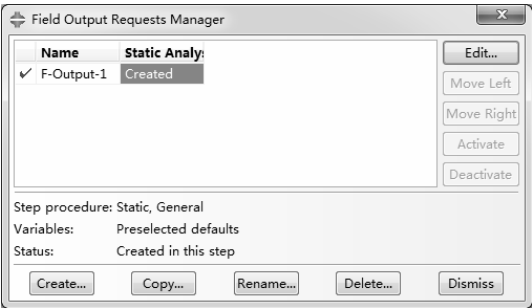


图 5-14 “场输出请求管理器”对话框

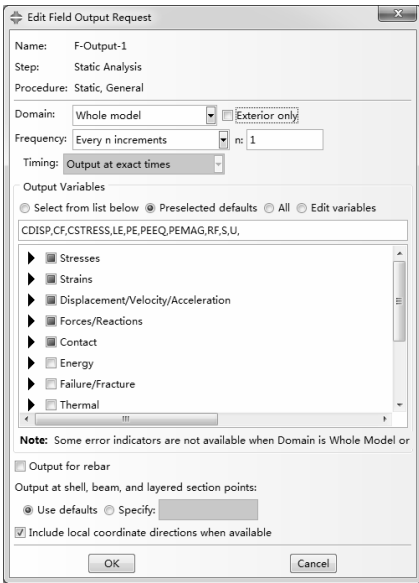


图 5-15 “编辑场输出请求”对话框

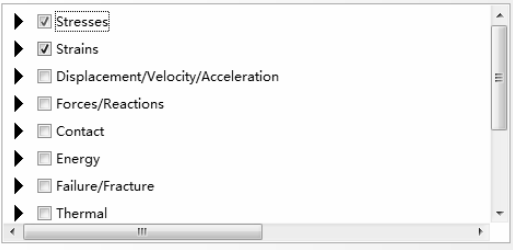


图 5-16 选择输出应力和应变

5. 创建显示体约束

进入 Interaction（相互作用）模块，对本实例进行显示体约束。

（1）单击工具栏中的  Create Constraint（创建约束）按钮，弹出 Create Constraint（创建约束）对话框，输入约束名称，在 Type（类型）菜单中选择 Display body（显示体），如图 5-17 所示。单击 Continue...按钮，在视图中选取轴瓦的实体模型，在弹出的 Edit Constraint（编辑约束）对话框中点选 Follow three points（跟随 3 个点）单选按钮，如图 5-18 所示。

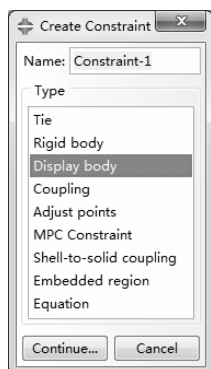


图 5-17 “创建约束”对话框

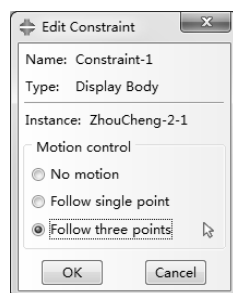


图 5-18 “编辑约束”对话框

单击 （选择）按钮，在视图中选择轴承座的实体孔壁上的 3 个点，如图 5-19 所示。

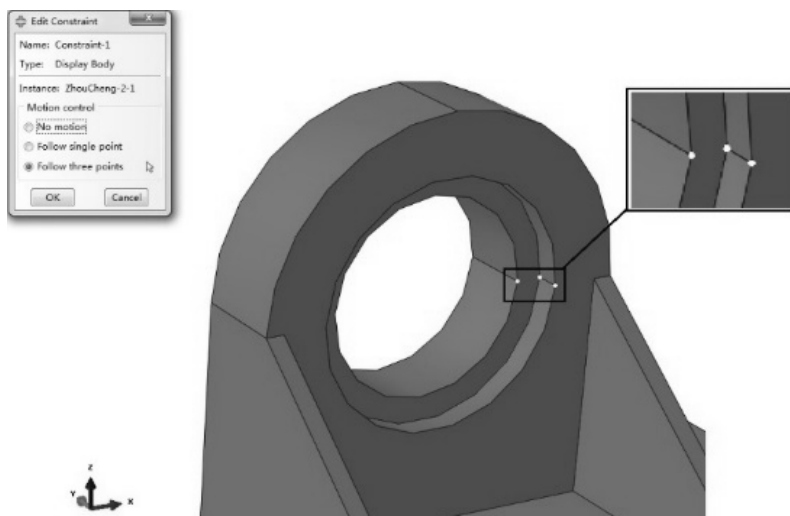


图 5-19 选择 3 个点

（2）定义轴的显示体约束，与轴瓦的定义方式相同。

6. 载荷与边界条件

进入 Load（载荷）模块，对本实例的模型施加 Pressure（压力）和相应的边界条件。

（1）轴承孔的圆柱面的上半部分承受轴瓦的推力载荷，下半部分受到径向的压力载荷，为了方便载荷的定义，防止运算出错，需要对这个圆柱面进行分割。

在 Part 模块中选择轴承座，单击工具栏中的 Partition Face（分割面）工具，在弹出的  工具栏中选择  Partition Face: Use Shortest Path Between 2 Points（分割面：使用两点间连线）工具 ，在大小两个圆柱面边缘分别选择两个点，完成曲面的分割。圆柱面分割结果如图 5-20 所示。

(2) 载荷, 在模块列表中选择 Load (载荷) 模块, 在上方的 Tools (工具) 菜单中选择 Surface (表面) → Create (创建) 选项, 弹出 Create Surface (创建表面) 对话框, 在视图中选取大小两个圆柱面的上半部分和下半部分, 分别创建两个表面, 用于施加推力和压力载荷, 如图 5-21 和图 5-22 所示。

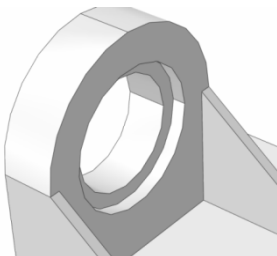


图 5-20 分割曲面

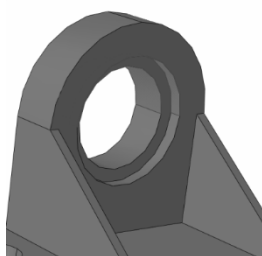


图 5-21 施加推力载荷

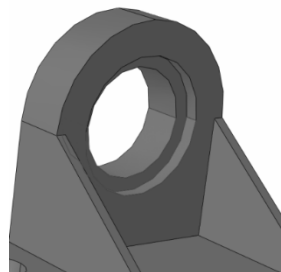


图 5-22 施加压力载荷

(3) 首先定义圆柱面下表面的径向压力载荷。单击 Create Load (创建载荷) 按钮, 弹出如图 5-23 所示的对话框, 定义载荷的名称后, 在 Step (分析步) 列表中选择 Static Analysis 选项, 在 Types for Selected Step (可用于所选分析步) 类型栏内选择 Pressure (压强), 单击 Continue... 按钮后, 单击提示区右侧的 Surface (表面) 按钮, 在弹出的 Region Selection (区域选择) 中选取对应的上下圆柱面, 单击 Continue... 按钮, 弹出图 5-24 所示的 Edit Load (编辑载荷) 对话框, 在 Magnitude (大小) 栏中输入 50, 单击 OK 按钮, 效果如图 5-25 所示。

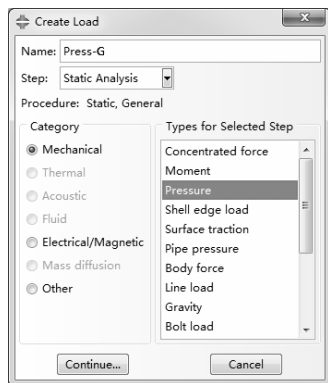


图 5-23 “创建载荷”对话框

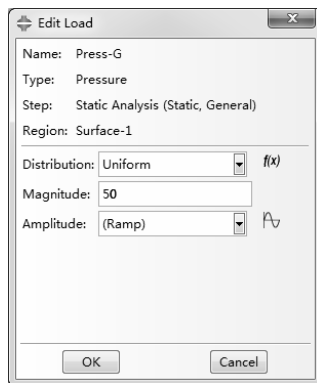


图 5-24 “编辑载荷”对话框

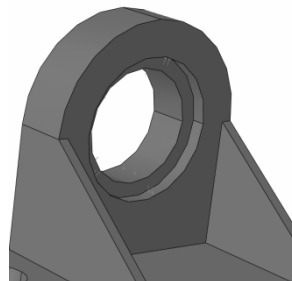


图 5-25 压力载荷

(4) 边界条件

轴承座通过 4 个安装孔进行固定, 因此边界条件为对这 4 个安装孔和基座底面进行固定约束。

单击工具栏中的 Create Boundary Condition (创建边界条件) 按钮, 在弹出的如图 5-26 所示的对话框中创建一个类型为 Symmetry/Antisymmetry/Encastre (对称/反对称/完全固定) 的边界条件, 单击 Continue... 按钮后, 在弹出的如图 5-27 所示的对话框中选择 ENCASTRE ($U_1=U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$) 进行完全固定。边界条件所选择的区域为轴承基座的 4 个固定孔及基座的下底面, 产生的边界条件如图 5-28 所示。

7. 划分网格

进入 Mesh (网格) 模块, 对部件进行网格划分。由于轴和轴瓦都设置为显示体, 因此无须对其进行网格划分, 只需对基座进行划分即可。

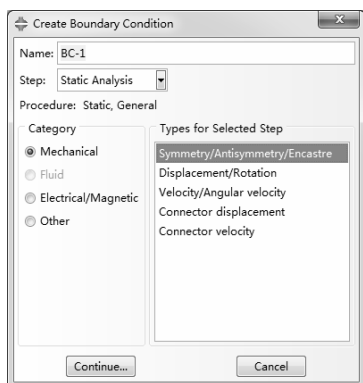


图 5-26 创建边界条件

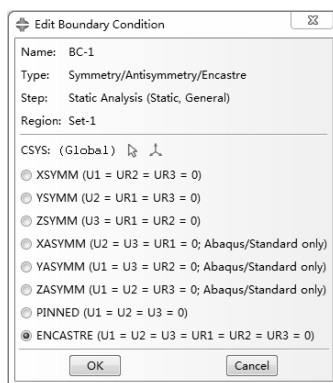


图 5-27 编辑边界条件

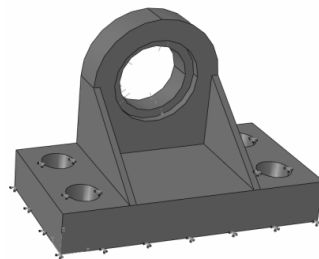


图 5-28 边界条件

(1) 布种

单击工具箱中的 Seed Part Instance (全局种子) 按钮, 弹出如图 5-29 所示的 Global Seeds (全局种子) 对话框, 在 Approximate global size (近似全局尺寸) 栏中填入 3, 单击 OK 按钮完成布种, 如图 5-30 所示。

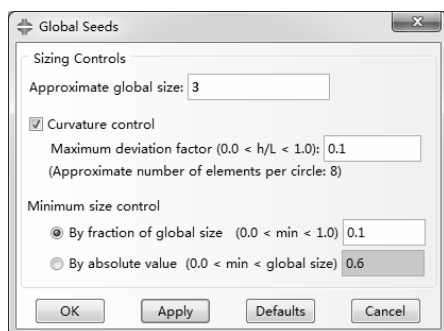


图 5-29 全局种子设置

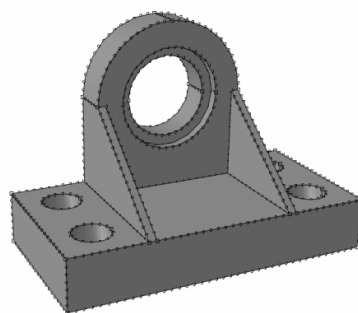


图 5-30 完成布种

(2) 网格控制

单击工具箱中的 Assign Mesh Controls (指派网格控制) 按钮, 弹出如图 5-31 所示的 Mesh Controls (网格控制属性) 对话框, 可以看到无法对部件进行六面体单元划分, 因此需要对模型进行分割, 拆分成多个分区, 再对其进行六面体单元网格划分。

单击工具箱中的 Partition Cell: Define Cutting Plane (拆分几何元素) 按钮, 在视图图中选择 3 个点来控制分区平面, 分区后的部件如图 5-32 所示。

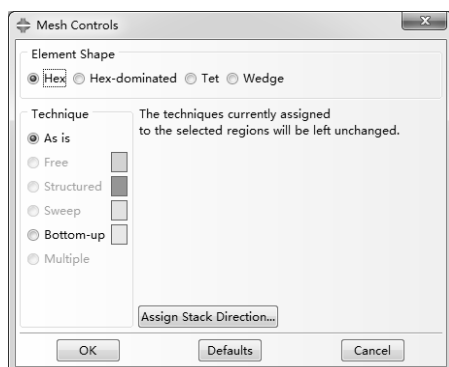


图 5-31 “网格控制属性”对话框

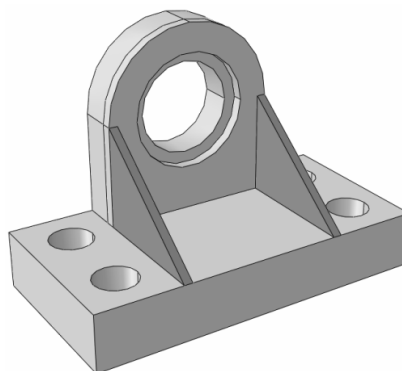


图 5-32 实例分区 (5 个分区)

对拆分区后的部件进行网格控制属性设置，如图 5-33 所示，选择网格技术（Technique）为扫掠（Sweep），选择进阶算法（Advancing Front）进行网格划分。

单击工具栏的  Assign Element Type 按钮，弹出如图 5-34 所示的对话框，进行单元类型的设置。在对话框中取消对 Reduced Integration（缩减积分）的选择，选择 C3D20 单元类型。

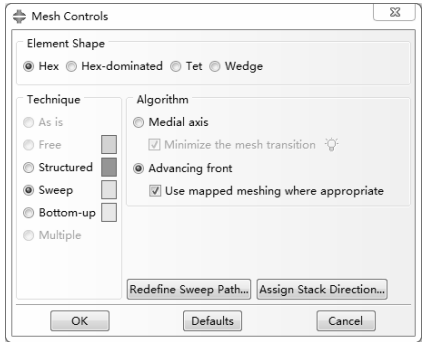


图 5-33 网格控制属性

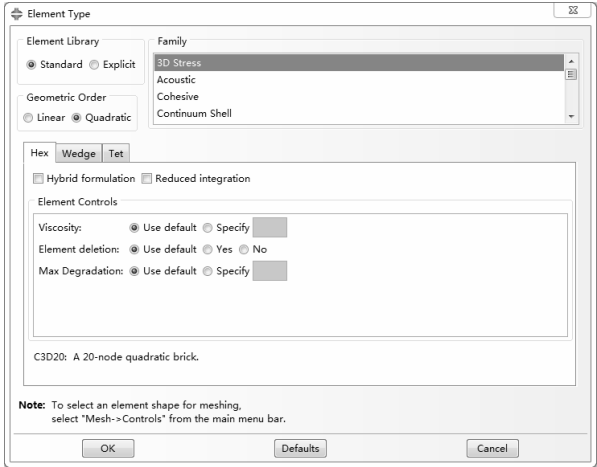


图 5-34 单元类型

单击工具栏中的  Mesh Part Instance（创建网格部件）按钮，进行网格划分，如图 5-35 所示。

8. 运行分析

（1）创建分析作业

在 Module 列表中选择 Job 进入作业模块，单击工具栏中的  Job Manager（作业管理）按钮，弹出如图 5-36 所示的 Job Manager（作业管理器）对话框，单击 Create（创建）按钮，在弹出的如图 5-37 所示的 Create Job（创建作业）对话框中输入作业名称，单击 Continue...按钮，进入如图 5-38 所示的 Edit Job（编辑作业）对话框，单击 OK 按钮。

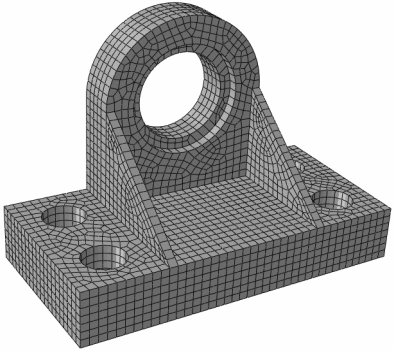


图 5-35 划分网格

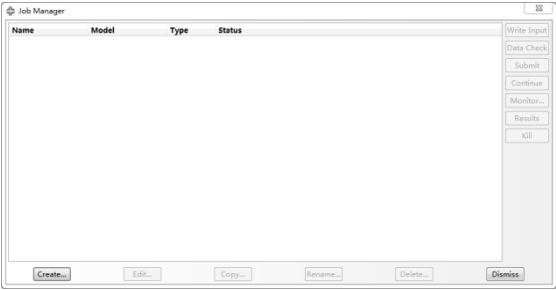


图 5-36 “作业管理器”对话框

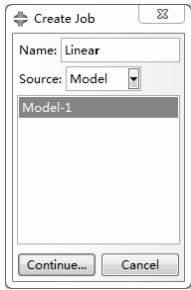


图 5-37 “创建作业”对话框

（2）提交分析作业

在如图 5-36 所示的作业管理器中单击 Data Check 按钮进行数据检查，检查无误后单击 Submit 按钮进行分析。

9. 后处理

单击作业管理器中的 Results 按钮，进入 Visualization（可视化）模块，在视图区显示如图 5-39 所示的无变形图。

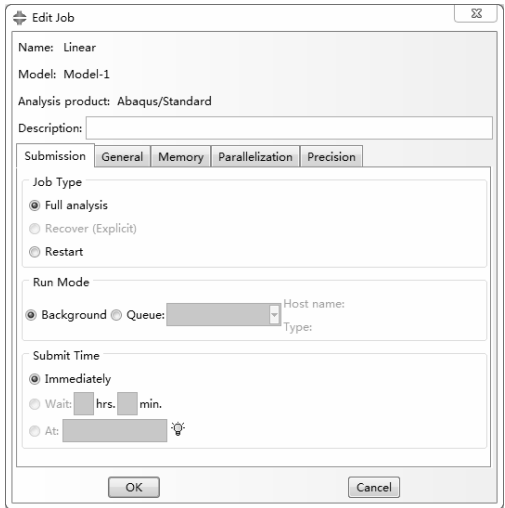


图 5-38 “编辑作业”对话框

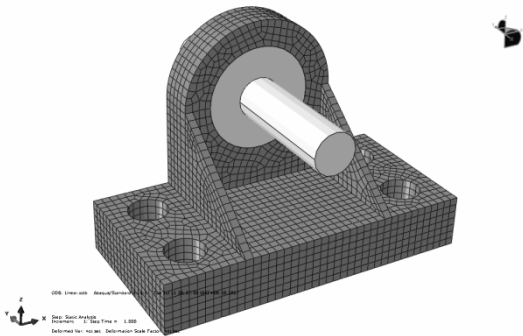


图 5-39 无变形图

单击工具栏中的 Create Display Group（创建显示组）工具，弹出如图 5-40 所示的 Create Display Group（创建显示组）对话框，在 Item（项）栏中选择 Part Instance（部件实例）选项，在右侧的列表中选择 ZHOUCHEG-1-1，单击下方的  Intersect 按钮，显示只有轴承座的模型，如图 5-41 所示。

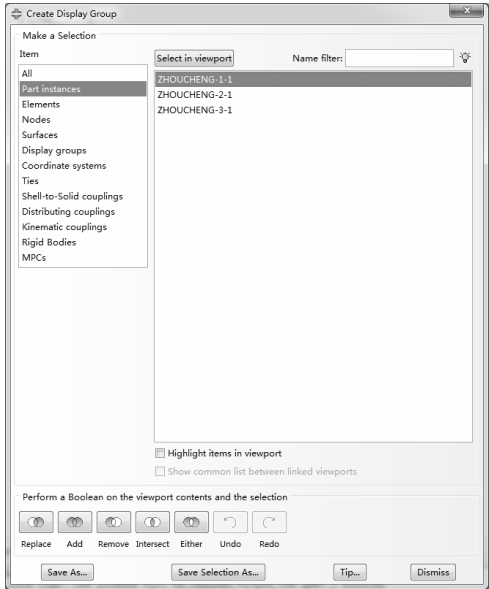


图 5-40 “创建显示组”对话框

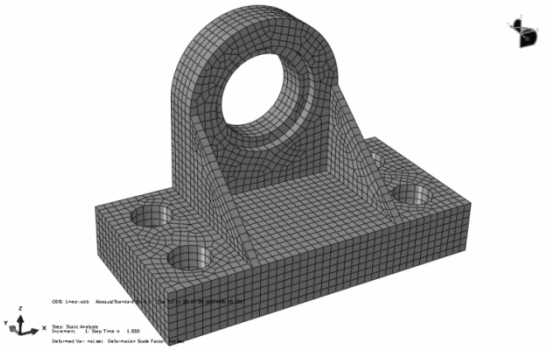


图 5-41 只显示轴承座

单击  Field Output Dialog 按钮，可以选择在视图区显示不同的云图，如图 5-42～图 5-51 所示。

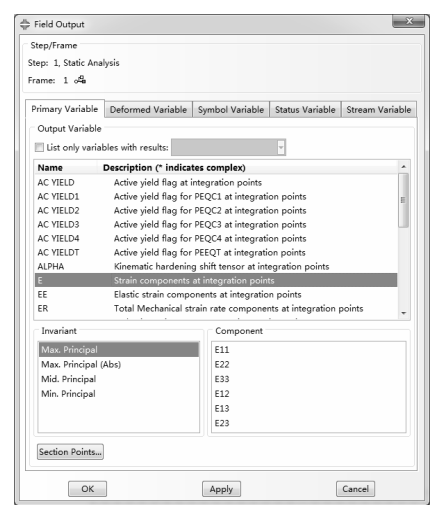


图 5-42 选择积分点应变

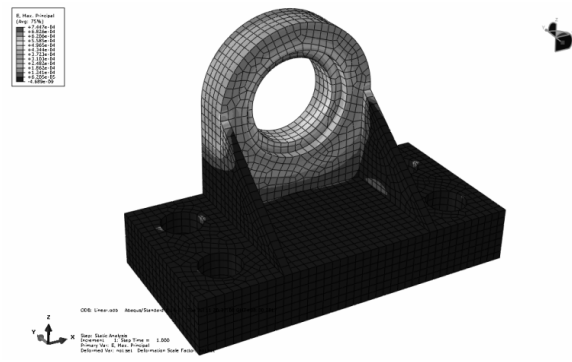


图 5-43 积分点应变云图

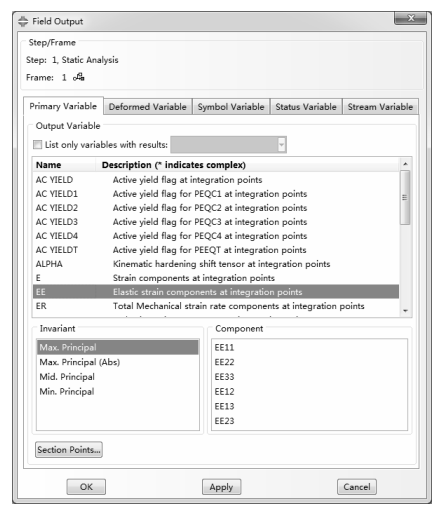


图 5-44 选择弹性应变

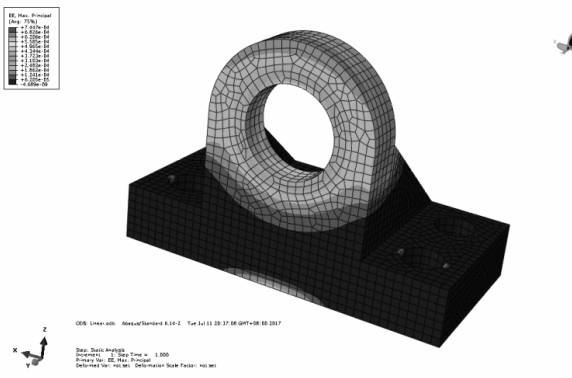


图 5-45 弹性应变云图

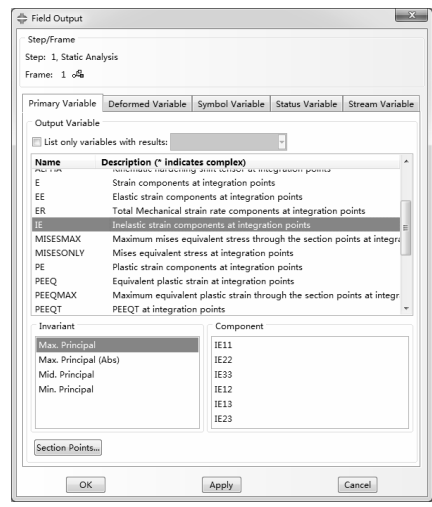


图 5-46 选择非弹性应变

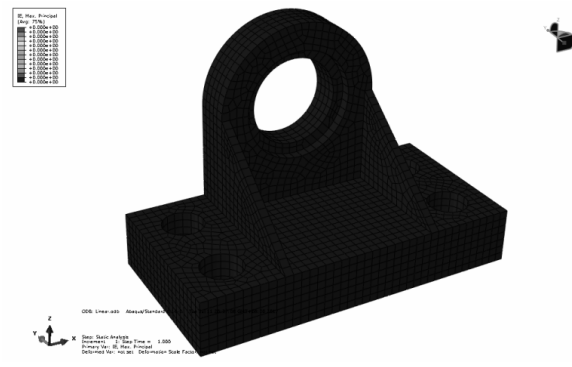


图 5-47 非弹性应变云图

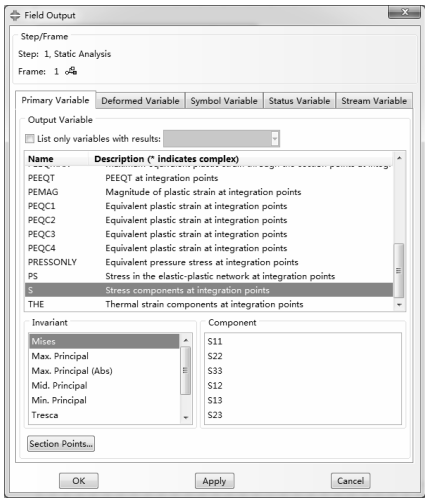


图 5-48 选择最大 Mises 应力

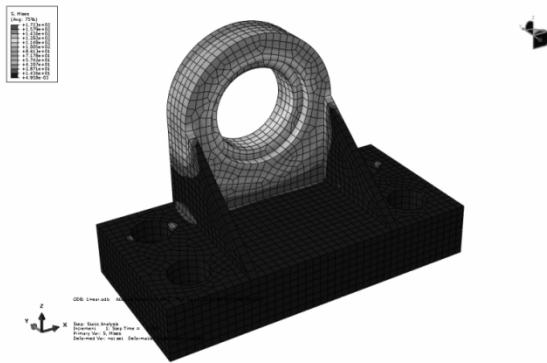


图 5-49 最大 Mises 应力云图

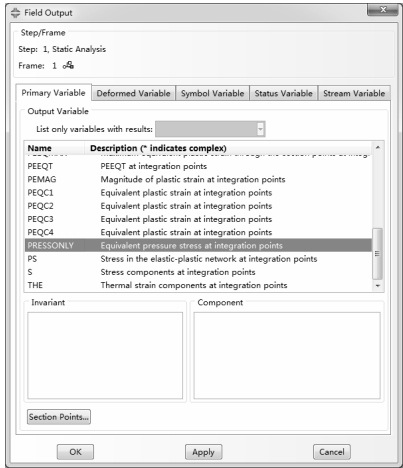


图 5-50 选择等效压应变

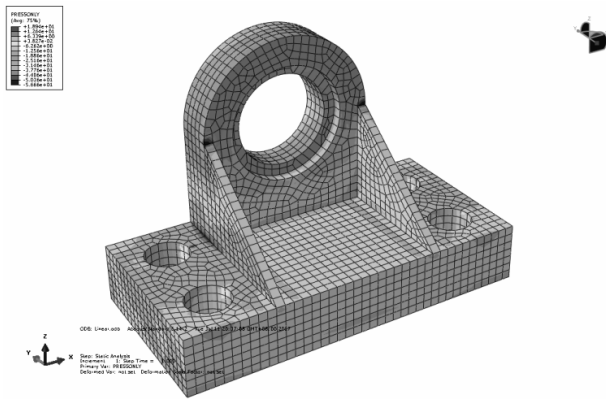


图 5-51 等效压应变云图

5.3 非线性分析概述

线性分析是对事物物理本质的一种近似描述，对于绝大多数问题来说，线性分析是不能够解决问题的。非线性问题在日常生活中更为普遍，这就需要我们掌握非线性分析方法。非线性分析本身很复杂。一是对问题的描述复杂，例如对材料非线性性质的描述（如怎样正确选用某些指标来定义材料的损伤、失效，由于要得到材料的真实本构关系很困难，因此正确地表述也存在难度），对非线性过程的描述（如接触分离现象）；二是求解非线性方程的过程复杂，例如求解稳定问题时用到的弧长法等。

5.3.1 线性与非线性的区别

1. 线性分析

到目前为止所讨论的分析实例均为线性情形，也就是施加的载荷和系统响应间存在线性关系。

例如，如果一线性弹簧在 10N 的载荷下伸长 1m，那么施加 20N 的载荷就会伸长 2m。这意味着在线性分析中，结构的柔度阵只需计算一次（将刚度阵集成并求逆即可得到）。其他载荷情形下，结构的线性响应可通过将新的载荷向量与刚度阵的逆相乘得到。

此外，结构对不同载荷情形的响应，可以通过用常数进行比例变换或相互叠加的方式，来得到结构对新载荷的响应。这就要求新载荷是先前各载荷的线性组合。载荷的叠加原则是假定所有载荷的边界条件相同。

ABAQUS 在线性动力学模拟中使用了载荷的叠加原理。

2. 非线性分析

结构的非线性问题指结构的刚度随其变形而改变的问题。实际上所有的物理结构均为非线性的，而线性分析只是一种方便的近似。显然，线性分析对包括加工过程的许多结构模拟来说是不够的，例如，锻造或冲压、压溃分析、橡胶部件、轮胎和发动机垫圈分析等问题。一个简单的例子就是具有非线性刚度响应的弹簧。

对于非线性问题由于刚度依赖于位移，所以不能再用初始柔度乘以所施加的载荷的方法来计算任意载荷时弹簧的位移了。在非线性分析中结构的刚度阵在分析过程中必须进行多次的生成、求逆，这使得非线性分析求解比线性分析耗时多得多。

由于非线性系统的响应不是所施加载荷的线性函数，因此不可能通过叠加来获得不同载荷的解。每种载荷都必须作为独立的分析进行定义及求解。

5.3.2 非线性问题的来源

1. 材料非线性

大多数金属在应变时都具有良好的线性应力—应变关系，但在应变较大时，材料会发生屈服，此时材料的响应变成了非线性和不可逆的。

材料的非线性也可能与应变以外的其他因素有关。应变率相关材料材料参数和材料失效都是材料非线性的表现形式。材料性质也可以是温度和其他预先设定的场变量的函数。

2. 几何非线性

几何非线性发生在结构位移的大小影响到结构响应的情形。这可能由于以下几种原因：大挠度或转动、“突然翻转”、初应力或载荷硬化。例如，端部受竖向载荷的悬臂梁，如图 5-52 所示。若端部挠度较小，分析时可以认为是近似线性的。然而若端部的挠度较大，结构的形状乃至其刚度都会发生改变。另外，若载荷不能保持与梁垂直，载荷对结构的作用将发生明显的改变。当悬臂梁自由端部挠曲时，载荷可以分解为一个垂直于梁的分量和另一个沿梁的长度方向作用的分量。所有这些效应都会对悬臂梁的非线性响应产生影响（也就是梁的刚度随它所承受载荷的增加而不断变化）。

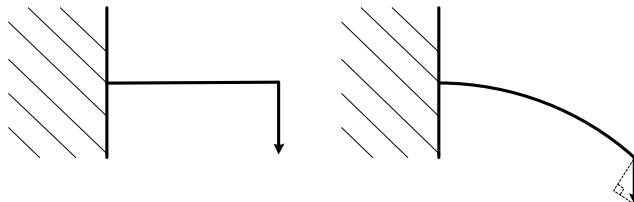


图 5-52 悬臂梁的大挠度

可以预料大挠度和转动对结构承载方式有重要影响。然而，并非位移相对于结构尺寸很大时，几何非线性才显得重要。例如，一块很大的平板在所受压力下的“突然翻转”现象。当平

板突然翻转时，刚度就变成了负的。这样，尽管位移的量值相对于板的尺寸来说很小，在模拟分析中仍有严重的几何非线性效应，这是必须加以考虑的。

此时，只需对模型做些小的修改就可以将几何非线性效应包含于分析中。

首先要在定义分析步时考虑几何非线性效应，要给出分析步中允许的最大增量步的数目。如果 ABAQUS 需要比此数目更多的增量步来完成分析，它将中止分析并给出出错信息。

分析步中默认的增量步数是 100，但如果题目有显著的非线性，可能会需要更多的增量步。用户给出的增量步数目是 ABAQUS 可以采用的增量步数的上限，而不是它所必须使用的增量步数。

在非线性分析中，一个分析步是发生于一段有限的“时间”内的。除非该问题中惯性效应或率相关效应是重要因素，否则这里的“时间”并没有物理含义。

用户是在这个理解背景下指定初始时间增量 $\Delta T_{\text{initial}}$ 和此分析步的总时间 ΔT_{total} 的。这些数据也指定了第一个增量步中所施加的载荷的比例。初始载荷增量的计算见式 (5-1)。

$$\text{初始载荷增量} = \frac{\Delta T_{\text{initial}}}{\Delta T_{\text{total}}} \times \text{载荷值} \quad (5-1)$$

初始时间增量的选择对于某些非线性模拟计算可能会很关键，但对大多数分析来说，初始时间增量的大小介于总分析步时间的 5%~10% 之间通常是足够的，除非模型中包含率相关材料效应或阻尼器等情况。在静态模拟计算时，为了方便，总分析步时间通常均置为 1.0。当总分析步时间为 0.1 时，所施加载荷的比例总是等于当前的时间步大小，也就是当时间步为 0.5 时施加的载荷就是总载荷的 50%。

初始增量大小必须指定，但后面的增量大小却由 ABAQUS 自动控制。尽管也可以对增量大小进行进一步的人工控制，但 ABAQUS 的自动控制对于大多数非线性模拟计算来说是适合的。

如果收敛性问题造成过多的增量减小，使得增量值降到了最小值以下，ABAQUS 就会中止分析。默认的最小容许时间增量 ΔT_{min} 为 10^{-5} 乘以总分析步时间。

除了总分析步时间的限制外，ABAQUS 对最大时间增量 ΔT_{max} 没有默认的上界限制。用户也可以根据 ABAQUS 模拟计算的实际情况，指定不同的最小和/或最大容许的增量大小。如果知道模拟计算在所加载荷过大时，求解会出现问题（如模型在大载荷时会经历塑性变形），为了减小 ΔT_{max} ，此时就可以指定最大容许增量步。

在几何非线性分析中，局部的材料方向在每个单元中可能随变形而转动。对于壳、梁及桁架单元，局部的材料方向总是随变形而转动的。

对于实体单元，仅当单元参照非默认的局部材料方向时，局部材料方向才随变形而动，而在默认情况下局部材料方向在整个分析中将始终保持不变。

在节点上定义的局部方向在整个分析中始终保持不变，不随变形而转动。详细情况请参阅帮助文档的相关章节。

一旦在一个分析步中包括几何非线性，所有的后继分析步中都会自动考虑几何非线性。如果在一个后继分析步中没有要求几何非线性，ABAQUS 会发出警告信息并声明仍然包括几何非线性。

模型的大变形并不是唯一的重要几何非线性效应。ABAQUS 中刚度矩阵的计算也包括由于施加载荷引起的单元刚度项（称为载荷刚度）的计算，这些项能改善计算的收敛情况。另外，壳的薄膜载荷、缆索和梁的轴向载荷都对结构在横向载荷响应的刚度产生很大影响，所以在考虑几何非线性时，这种由于横向载荷对薄膜刚度的影响应该考虑在内。

3. 边界非线性

若边界条件随分析过程发生变化，就会产生边界非线性问题。如图 5-53 所示的悬臂梁，它随施加的载荷发生挠曲，直至碰到障碍。

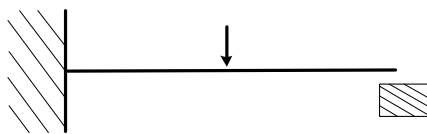


图 5-53 将碰到障碍物的悬臂梁

梁端部的竖向挠度与载荷在它接触到障碍以前是线性关系。在端部碰到障碍后梁端部的边界条件发生突然的变化，阻止竖向挠度继续增大，因此梁的响应将不再是线性的。边界非线性是极度不连续的，在模拟分析中发生接触时，结构的响应特性会在瞬时发生很大变化。

另一个边界非线性的例子是将板材材料冲压入模具的过程。在与模具接触前，板材在压力下的伸展变形是相对容易产生的，在与模具接触后，由于边界条件的改变，必须增加压力才能使板材继续成型。

5.3.3 非线性问题求解方法

用户在使用 ABAQUS 进行一般的非线性问题求解时，并不会接触到 ABAQUS 的理论模型。但是，对 ABAQUS 处理非线性问题的理论与方法有一定的了解，将对用户深入了解有限元方法、ABAQUS 求解过程有重要的作用。如果求解出现问题，对求解理论有一定的了解，能迅速找到问题症结所在，对于实际项目的分析可以提高效率与求解精确度。

因此 ABAQUS 将计算过程分为许多载荷增量步，并在每个载荷增量步结束时寻求近似的平衡构形。ABAQUS 通常要经过若干次迭代才能找到某一载荷增量步的可接受的解。所有增量响应的和就是非线性分析的近似解。

本节将引入一些新概念来描述分析中的不同组成部分。清楚地理解分析步、载荷增量步和迭代步的区别是很重要的。

模拟计算的加载过程包含单个或多个步骤，所以要定义分析步。它一般包含分析过程选择、载荷选择和输出要求选择。而且每个分析步都可以采用不同的载荷、边界条件、分析过程和输出要求。以板材变形为例说明：

步骤一：将板材夹于刚性夹具上。

步骤二：加载使板材变形。

步骤三：确定变形板材的自然频率。

增量步是分析步的一部分。在非线性分析中，一个分析步中施加的总载荷被分解为许多小的增量，这样就可以按照非线性求解步骤来进行计算。

当提出初始增量的大小后，ABAQUS 会自动选择后继的增量大小。每个增量步结束时，结构处于（近似）平衡状态，结果可以写入、输入数据库文件、重启动文件、数据文件或结果文件中。选择某一增量步的计算结果写入、输入数据库文件的数据称为帧（frames）。

迭代步是在某一增量步中找到平衡解的一种尝试。如果模型在迭代结束时不是处于平衡状态，ABAQUS 将进行另一轮迭代。

随着每一次迭代，ABAQUS 得到的解将更接近平衡状态；有时需要进行许多次迭代才能得到一个平衡解。当平衡解得到以后一个增量步才完成，即结果只能在一个增量步的末尾获得。

结构对于一个小的载荷增量 ΔP 的非线性响应如图 5-54 所示。ABAQUS 利用基于 U_0 时的结构初始刚度 K_0 和增量 ΔP 来计算结构的位移修正值 c_a 。利用 c_a 将结构的构形更新为 U_a 。

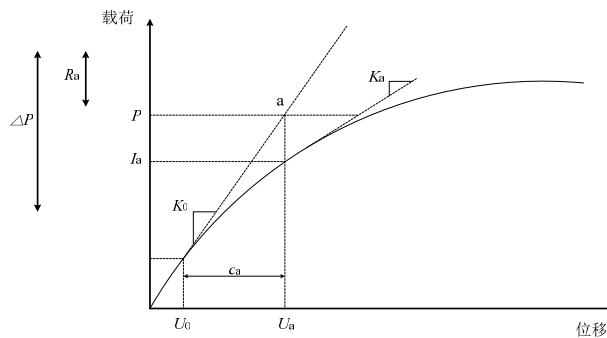


图 5-54 一个增量步中的首次迭代

基于结构新构形 U_a ，ABAQUS 形成新的刚度 K_a 。利用 K_a 来计算更新后的构形中结构的内部作用力 I_a 。所施加的总载荷 P 和 I_a 的差值计算见式 (5-2)：

$$R_a = P - I_a \quad (5-2)$$

式中 R_a ——迭代的作用力残差值。

如果 R_a 在模型的每一自由度上均为零，图 5-54 中的 a 点将位于载荷—位移曲线上，结构将处于平衡状态。在非线性问题中，几乎不可能使 R_a 等于零，因此 ABAQUS 将 R_a 与容许残差进行比较。

如果 R_a 比作用力容许残差小，ABAQUS 就接受结构的更新构形作为平衡结果。默认的容许残差设置为结构中对时间进行平均的作用力的 0.5%。ABAQUS 在整个模拟过程中自动从空间分布和对时间平均的角度计算该值。

若 R_a 比目前的容许残差小，就认为 P 和 I_a 处于平衡状态， U_a 就是结构在当前载荷下合理的平衡构形。而 ABAQUS 在接受此解前，还要检查位移修正值 c_a 与总的增量位移 $\Delta U_a = U_a - U_0$ 相比是否更小。若 c_a 大于增量位移的 1%，ABAQUS 将重新进行迭代。只有这两个收敛性检查都得到满足，才认为此载荷增量下的解是收敛的。

上述收敛判断规则有一个例外，即线性增量情况。线性增量的定义是指增量步内最大的力残差小于时间平均力乘以 10^{-8} 的增量步，凡严格满足这个定义的增量步无须再进行迭代，也无须进行任何检查即可认为其解是可接受的。

若迭代结果不收敛，ABAQUS 将进行另一种迭代以使内部和外部作用力达到平衡，如图 5-55 所示。第二种迭代采用前面迭代结束时计算得到的刚度 K_a 和 R_a ，一起来确定另一位移修正值 c_b ，这使得系统更加接近平衡状态。

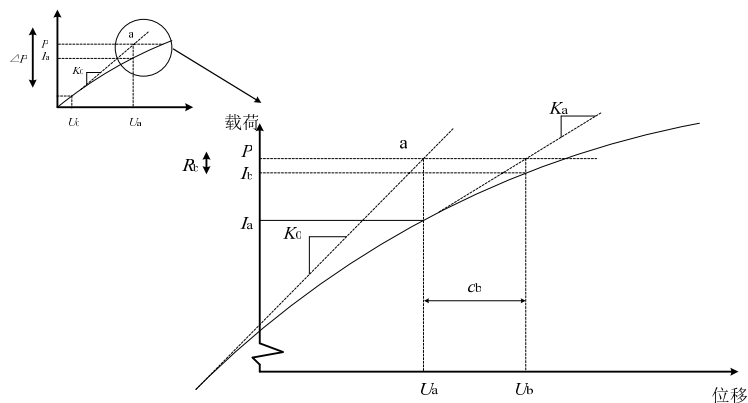


图 5-55 第二种迭代

ABAQUS 利用结构新构形 U_b 中的内部作用力计算新的作用力残值 R_b ，再次将任意自由度上的最大作用力残值与作用力残值容许值进行比较，将第二种迭代的位移修正值 c_b 与增量位移 $\Delta U_b = U_b - U_0$ 进行比较，如果需要的话 ABAQUS 将进行进一步的迭代。

对于非线性分析中的每次迭代，ABAQUS 要重新形成模型的刚度矩阵并求解方程组。从计算耗时的角度来说，这意味着每次迭代等价于进行一次完整的线性分析。现在可以清楚地看到非线性分析的计算耗时可能要比线性问题大许多倍。

可以在每一收敛的增量步上保存结果，所以非线性模拟计算中得到的输出数据量将是线性分析中可得到数据量的很多倍。因此在规划计算机资源时，就应考虑这些因素及计划选择的非线性模拟计算的类型。

ABAQUS 自动调整载荷增量步的大小，因此它能便捷而有效地求解非线性问题。用户只需在每个分析步计算中给出第一个增量的大小，ABAQUS 会自动调整后续增量的大小。

若用户未提供初始增量大小，ABAQUS 会试图将该分析步的全部载荷都作为第一增量步载荷来施加，这样在高度非线性问题中 ABAQUS 不得不反复减小增量大小，从而导致 CPU 时间的浪费。

一般来说，提供一个合理的初始增量大小是很有必要的，因为只有在很平缓的非线性问题中才可能将一个分析步中的所有载荷施加于一个增量步中。

在一个载荷增量里得到收敛解所需的迭代步数会随系统的非线性模拟而变化。默认情况下，如果在 16 次迭代中仍不收敛或出现发散，ABAQUS 会放弃当前增量步，并将增量大小置为先前值的 25% 重新开始计算，即利用比较小的载荷增量来找到收敛的解。

若此增量仍不收敛，ABAQUS 将再次减小增量大小。ABAQUS 允许一个增量步中最多有 5 次增量减小，否则就会中止分析。

如果增量步的解在少于 5 次迭代时就收敛，这表明找到解答相对容易，因此，如果连续两个增量步只需少于 5 次的迭代就可以得到收敛解，那么 ABAQUS 会自动将增量大小提高 50%。

5.4 非线性分析实例

5.4.1 几何非线性实例——薄板的形变

本小节将针对线性材料制成的薄板发生大尺度形变而导致的非线性问题进行讲解。如图 5-56 所示为一个薄板，该板与整体轴 1 的夹角为 30° ，一端固定，另一端被限制在轨道上，仅能沿平行于平板的轴向移动。该斜板是由各向同性线弹性材料构成，其弹性模量为 $2.7 \times 10^9 \text{Pa}$ ，泊松比 $\nu=0.33$ 。

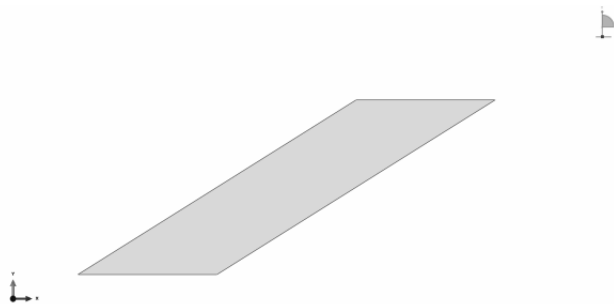


图 5-56 薄板模型

1. 创建部件

进入“Part”模块，弹出图 5-57 所示的 Create Part（创建部件）对话框，创建一个三维平面壳单元模型，单击 Continue...按钮进入草图编辑器，薄板草图如图 5-58 所示。

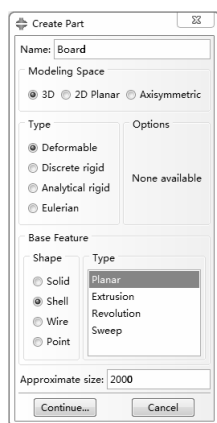


图 5-57 “创建部件”对话框

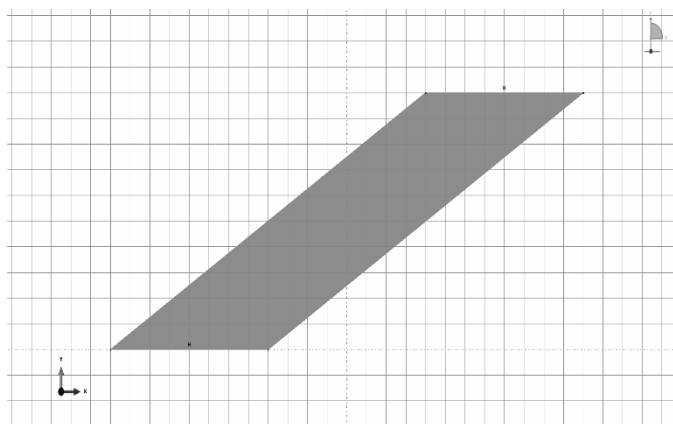


图 5-58 薄板草图

2. 创建材料和截面属性

(1) 创建材料

进入 Property（属性）模块，单击 Create Material 按钮，材料名称定义为 Steel，进入 Edit Material（编辑材料）对话框，选择 Mechanical Behaviors（材料行为）中的 Elasticity（弹性）选项，如图 5-59 所示。

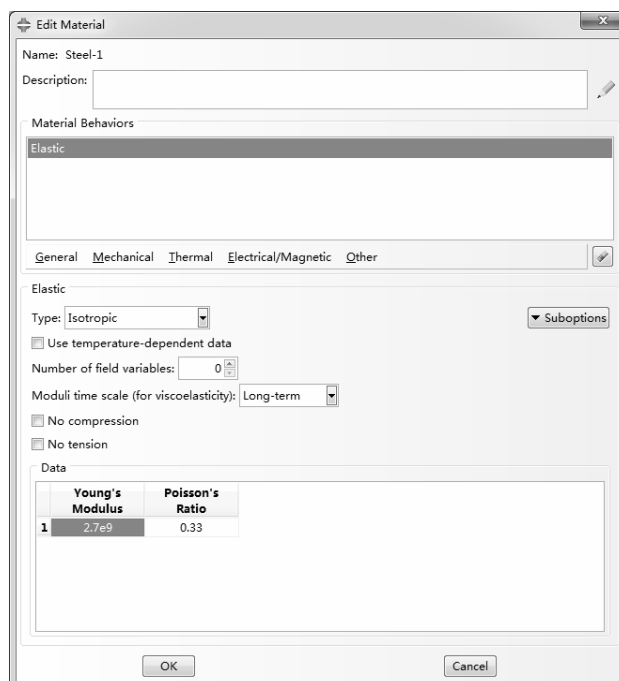


图 5-59 “编辑材料”对话框

(2) 创建截面

单击 Create Section 按钮，进入如图 5-60 所示的 Create Section（创建截面）对话框，选

择类别为 Shell (壳), 类型为 Homogeneous (均质), 单击 Continue... 按钮, 在弹出的 Edit Section (编辑截面) 对话框中输入厚度 10, 如图 5-61 所示。

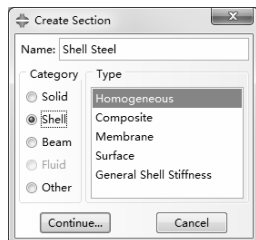


图 5-60 “创建截面”对话框

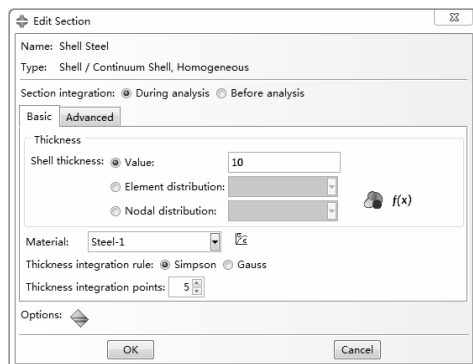


图 5-61 “编辑截面”对话框

(3) 创建坐标系

使用 创建基准坐标系工具, 定义一个如图 5-62 所示的基准直角坐标系。从主菜单中选择 Assign (指派) → Material Orientation (材料方向) 命令, 选择整个部件作为局部材料方向的有效区域。在视图中选择刚才建立的基准坐标系, 在弹出的如图 5-63 所示的 Edit Material Orientation (编辑材料方向) 对话框中选择 Axis 3 (轴 3) 作为法线方向, 单击 OK 按钮完成设置。

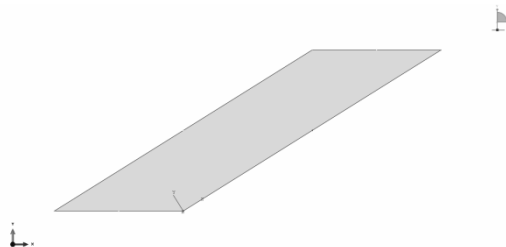


图 5-62 用于定义局部材料方向的基准坐标系

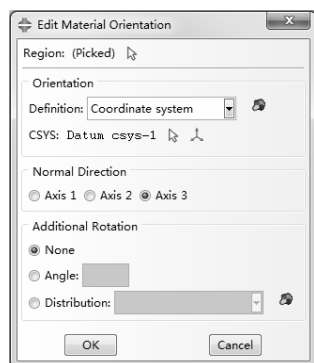


图 5-63 “编辑材料方向”对话框

(4) 指派截面

单击 Assign Section (截面指派) 按钮, 在视图中拾取部件, 单击鼠标中键, 弹出如图 5-64 所示的 Edit Section Assignment (截面指派) 对话框, 选择之前创建的 Shell Steel, 单击 OK 按钮完成设置。

3. 实例化

进入 Assembly (装配) 模块, 单击 Create Instance (创建实例) 按钮, 弹出如图 5-65 所示 Create Instance (创建实例) 对话框, 对部件进行实例化操作, 然后单击工具箱中的 Partition Face: Use Shortest Path Between 2 Points 按钮, 拾取薄板两个长边的中点, 完成对模型的分区, 如图 5-66 所示。

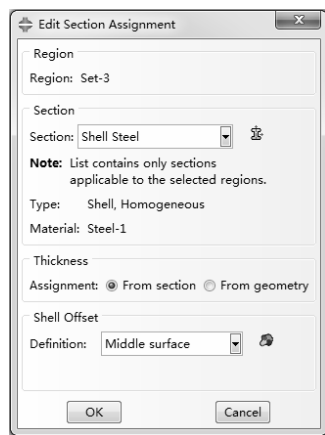


图 5-64 “编辑截面指派”对话框

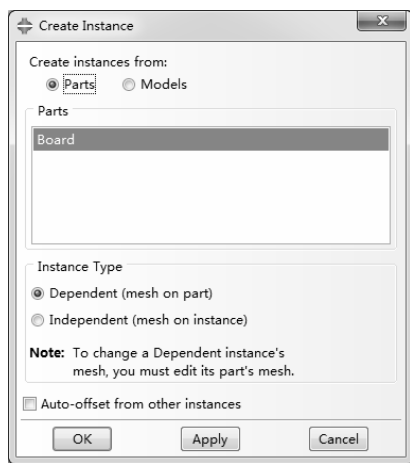


图 5-65 “创建实例”对话框

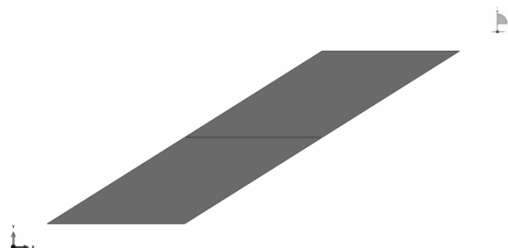


图 5-66 模型分区

4. 分析步

进入 Step 模块，单击 Create Step 按钮，弹出如图 5-67 所示的 Create Step（创建分析步）对话框，输入分析步名称，选择 Static，General（通用静态学）分析，单击 Continue...按钮，弹出如图 5-68 所示的 Edit Step（编辑分析步）对话框，在 Nlgeom（几何非线性）选项选择 Off，在 Incrementation（增量）选项卡中输入 Initial Incrementation Size（初始增量步）为 0.1，单击 OK 按钮完成设置。

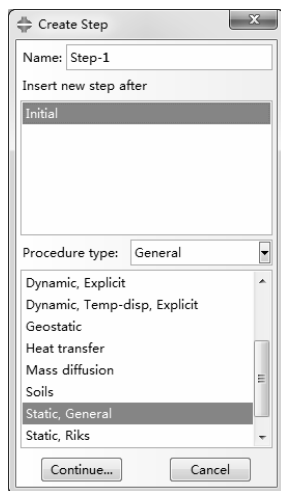


图 5-67 “创建分析步”对话框

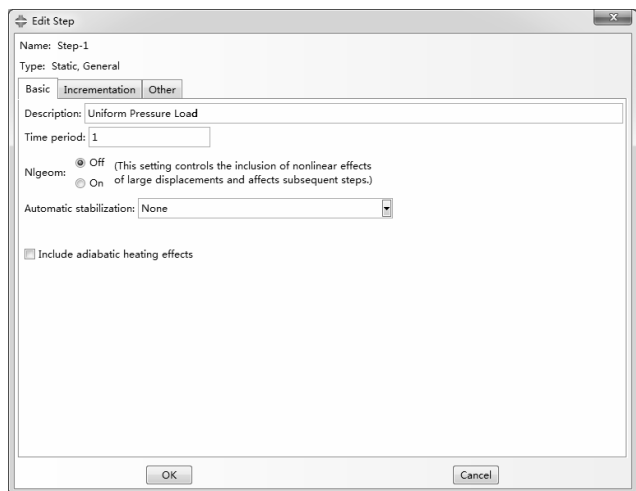


图 5-68 “编辑分析步”对话框

5. 载荷与边界条件

(1) 边界条件

进入 Load 模块，单击 Create Boundary Condition 按钮，弹出如图 5-69 所示的 Create Boundary Condition（创建边界条件）对话框，选择 Step-1（分析步），在薄板上部短边上创建一个 Displacement/Rotation（位移/转角）力学边界条件，单击 Continue...按钮后，在弹出的如图 5-70 所示的 Edit Boundary Condition（编辑边界条件）对话框中限制除 U2 以外的所有自由度。

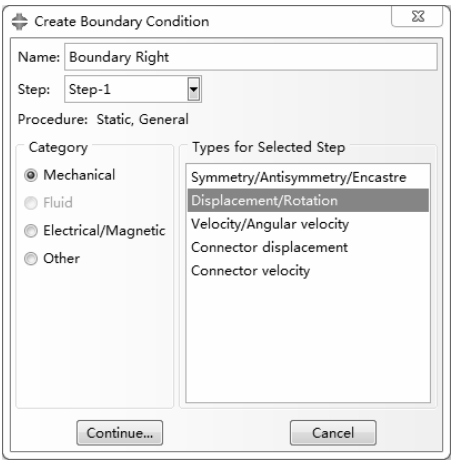


图 5-69 “创建边界条件”对话框

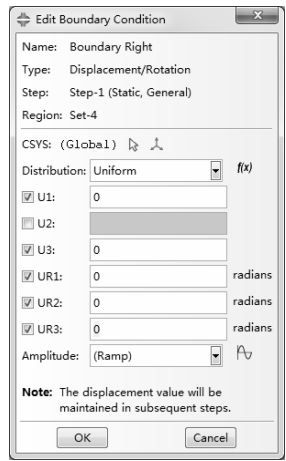


图 5-70 “编辑边界条件”对话框

以同样的方式，在薄板下部短边上创建一个边界条件，对其所有的自由度进行约束，如图 5-71、图 5-72 所示。

(2) 载荷

单击 Create Load 按钮，弹出如图 5-73 所示的 Create Load(创建载荷)对话框，选择 Pressure (压强)，然后选择部件的两个分区后确认，在弹出的如图 5-74 所示的 Edit Load (载荷编辑)对话框中输入压强大小后确认。

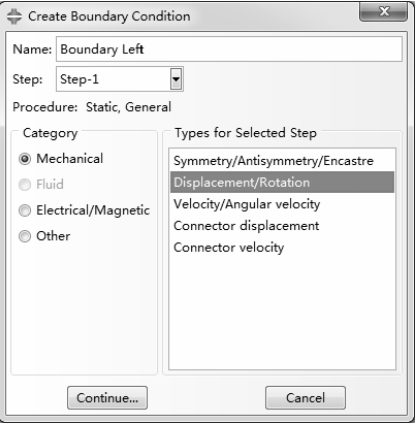


图 5-71 “创建边界条件”对话框

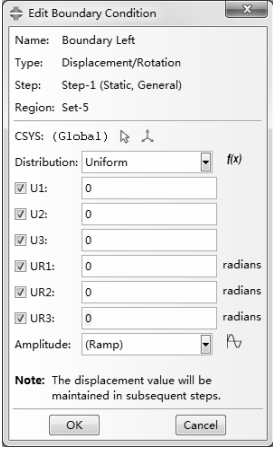


图 5-72 “编辑边界条件”对话框

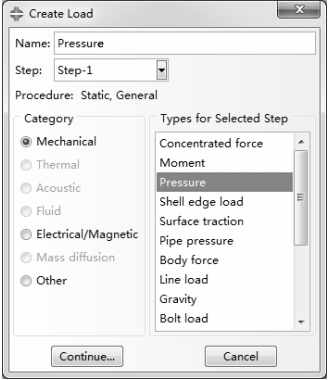


图 5-73 “创建载荷”对话框

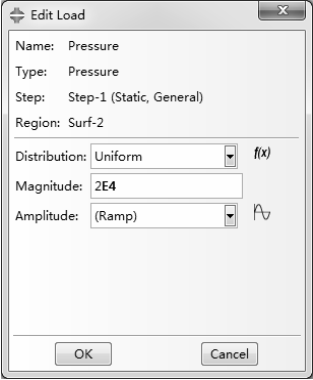


图 5-74 “载荷编辑”对话框

6. 网格划分

进入 Mesh 模块，单击  Seed Part Instance 按钮，在弹出的如图 5-75 所示的对话框中输入近似全局尺寸数据，确认后，单击  Assign Mesh Controls 按钮（指派网格控制），在如图 5-76 所示的对话框中选择网格的 Technique 为 Structured（结构），单击 OK 按钮，关闭对话框。

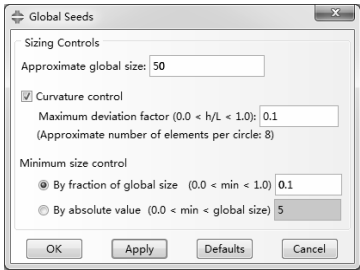


图 5-75 “全局种子”对话框

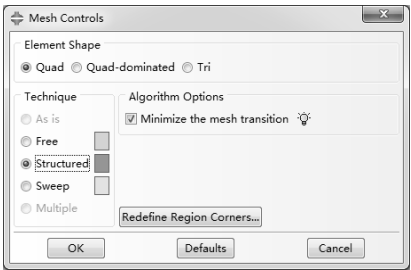


图 5-76 “网格控制”对话框

单击  Assign Element Type 按钮，按照如图 5-77 所示设置网格的单元类型，完成后单击  Mesh Part Instance 进行网格划分，如图 5-78 所示。

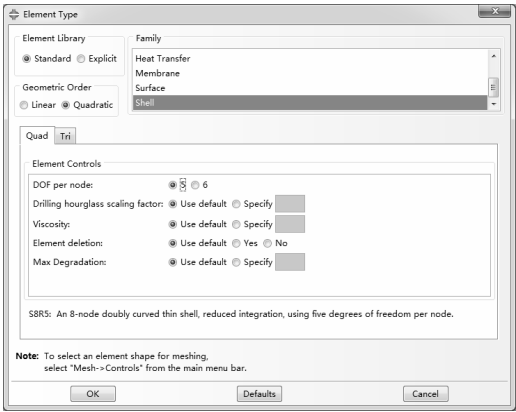


图 5-77 “单元类型”对话框

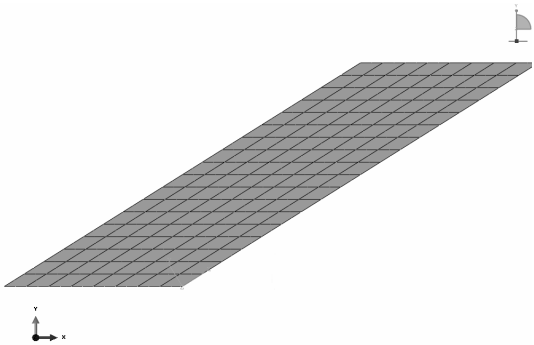


图 5-78 网格划分

7. 分析作业

进入 Job 模块，单击  Create Job(创建作业)按钮创建作业，如图 5-79 所示，单击 Continue... 按钮，弹出如图 5-80 所示的 Edit Job（编辑作业）对话框，单击 OK 按钮完成作业的创建。



图 5-79 “创建作业”对话框

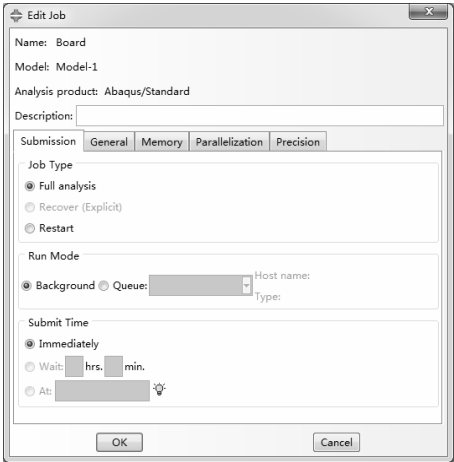


图 5-80 “编辑作业”对话框

单击  Job Manager 按钮，弹出如图 5-81 所示的 Job Manager（作业管理器）对话框，单击 Submit 按钮提交作业。

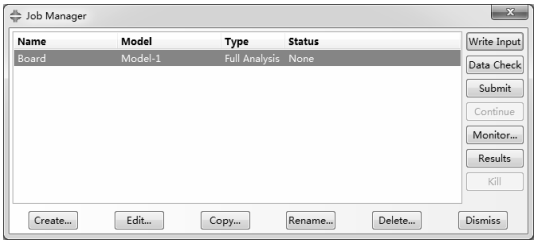


图 5-81 “作业管理器”对话框

8. 后处理

运算完成后单击 Job Manager（作业管理器）中的 Results，进入 Visualization 可视化模块。单击  Common Options 按钮，弹出如图 5-82 所示的 Common Plot Options（通用绘图选项）对话框，选择 Deformation Scale Factor（变形缩放系数）为 Uniform（一致），数值为 1。单击  按钮，视图中显示了 1:1 变形后的模型，如图 5-83 所示。

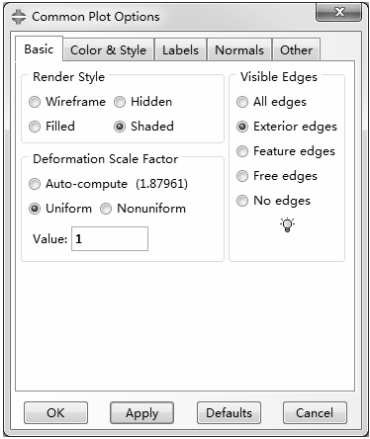


图 5-82 “通用绘图选项”对话框

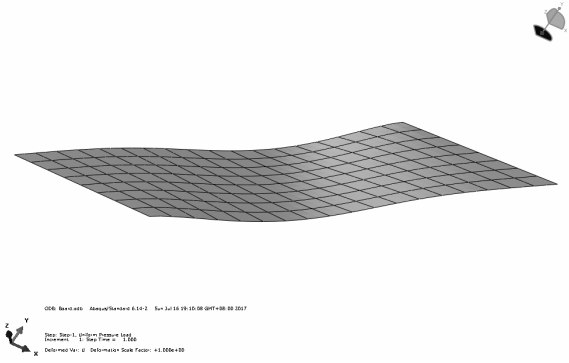


图 5-83 1:1 变形图

单击  Field Output Dialog 按钮，选择不同的变量，单击 Apply（应用）按钮可在视图区显示不同的云图，如图 5-84~图 5-93 所示。

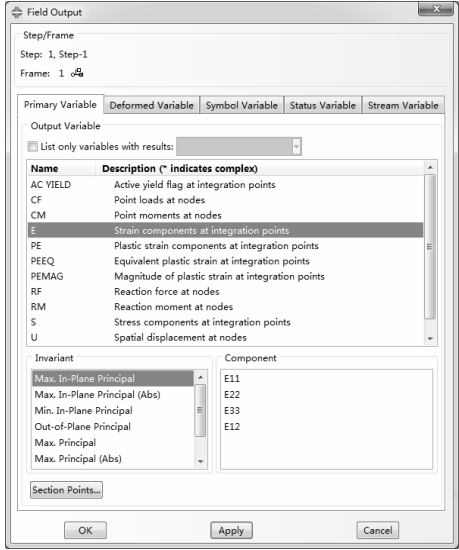


图 5-84 选择积分点变量

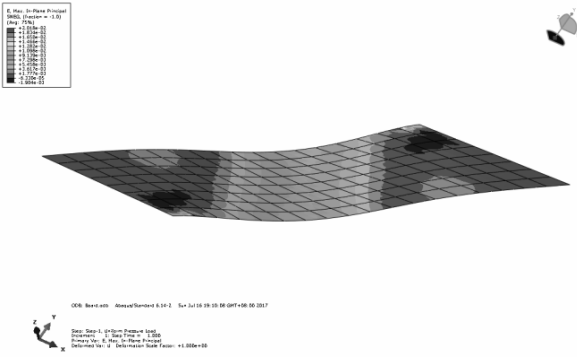


图 5-85 积分点应变云图

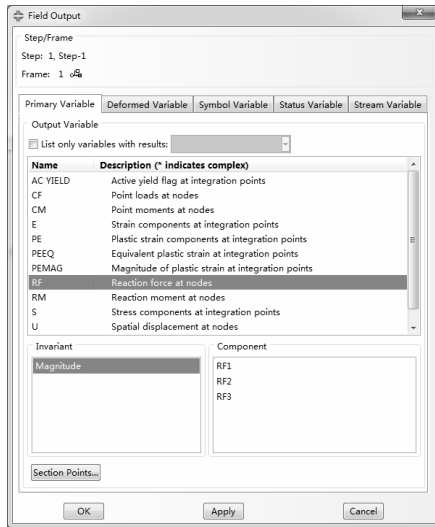


图 5-86 选择支点反力



图 5-87 支点反力云图

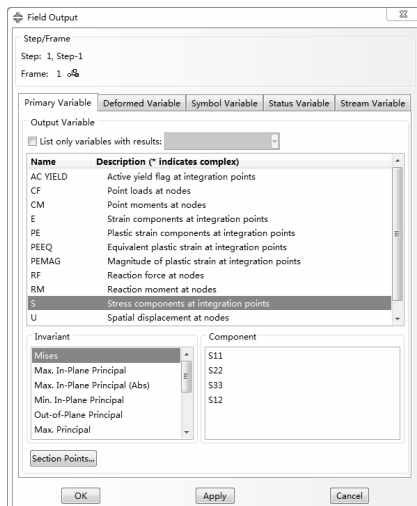


图 5-88 选择最大 Mises 应力

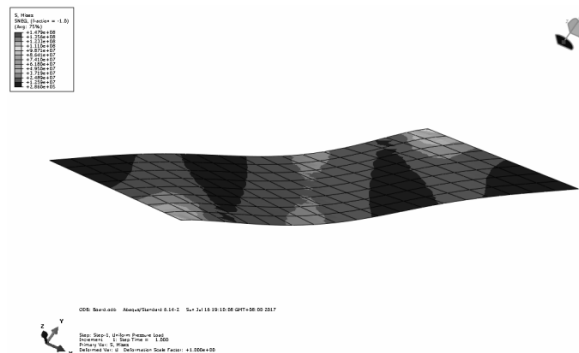


图 5-89 最大 Mises 应力云图

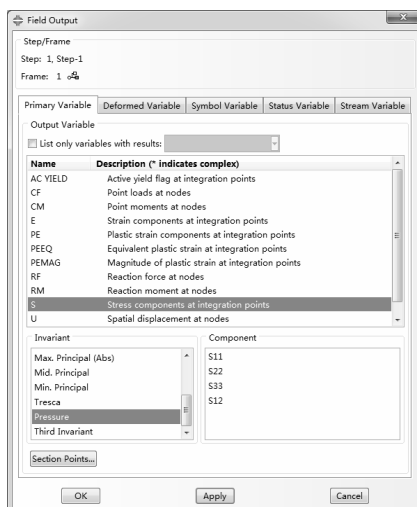


图 5-90 选择等效压应变

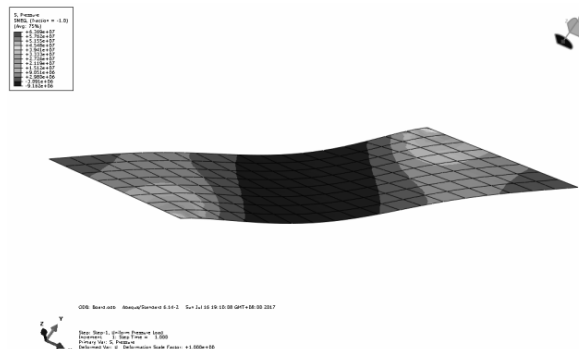


图 5-91 等效压应变云图

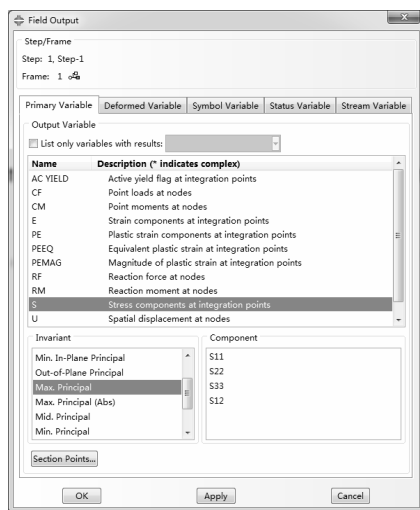


图 5-92 选择最大主应力

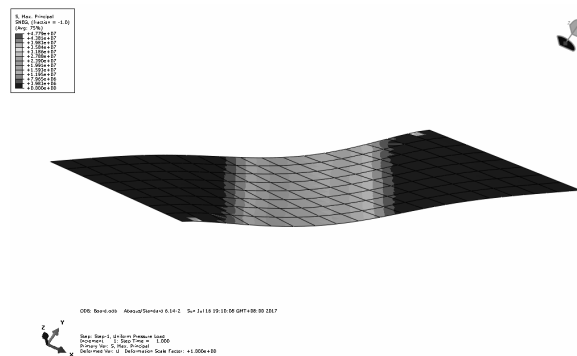


图 5-93 最大主应力云图

5.4.2 材料非线性实例——橡胶块的超弹性

如图 5-94 所示的橡胶支座，橡胶垫的上下表面固定在厚度相同的钢板上，通过钢板，将载荷均匀传递给橡胶垫。

由于该实例中的模型和载荷都是轴对称的，所以在模拟中使用轴对称模型进行分析，取模型的一个过对称轴的截面进行分析即可。

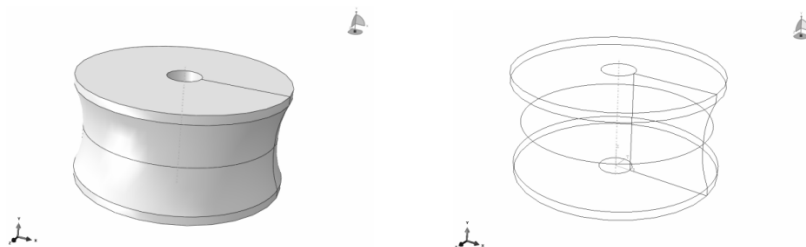


图 5-94 支座效果图

1. 创建部件

进入 Part (部件) 模块，单击 Create Part (创建部件) 按钮，创建一个轴对称壳单元模型，草图绘制如图 5-95 所示。

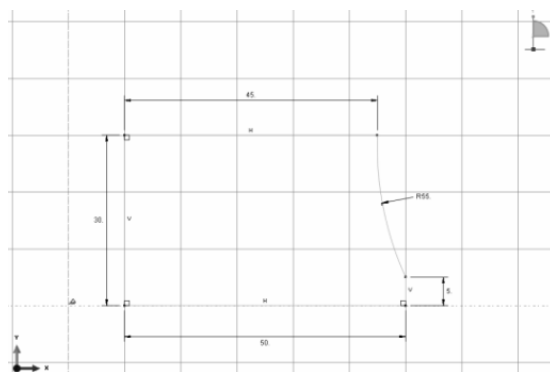


图 5-95 截面草图

创建完成的模型如图 5-96 所示，并按照图 5-97 所示对其进行分区。

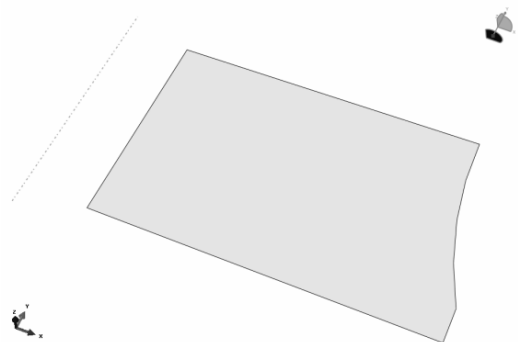


图 5-96 模型

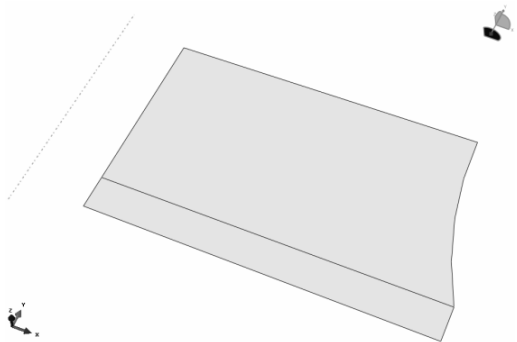


图 5-97 模型分区

2. 创建材料及截面属性

(1) 创建材料

进入 Property（属性）模块，单击  Create Material（创建材料）按钮，创建名为 Rubber 的材料，单击 Continue...按钮后，弹出如图 5-98 所示的 Edit Material（编辑材料）对话框，根据表 5-1～表 5-3 所示的数据，分别按照图 5-99～图 5-101 所示进行编辑。

表 5-1 单轴拉伸试验

应力/MPa	应 变
0.054	38000
0.152	133800
0.254	221000
0.362	345000
0.459	460000
0.583	624200
0.656	851000
0.730	1426800

表 5-2 双轴拉伸试验

应力/MPa	应 变
0.089	20000
0.255	140000
0.503	420000
0.958	1490000
1.703	2750000
2.413	3450000

表 5-3 平面剪切试验

应力/MPa	应 变
0.055	69000
0.342	282800
0.758	1386200
1.269	3034500
1.779	4062100

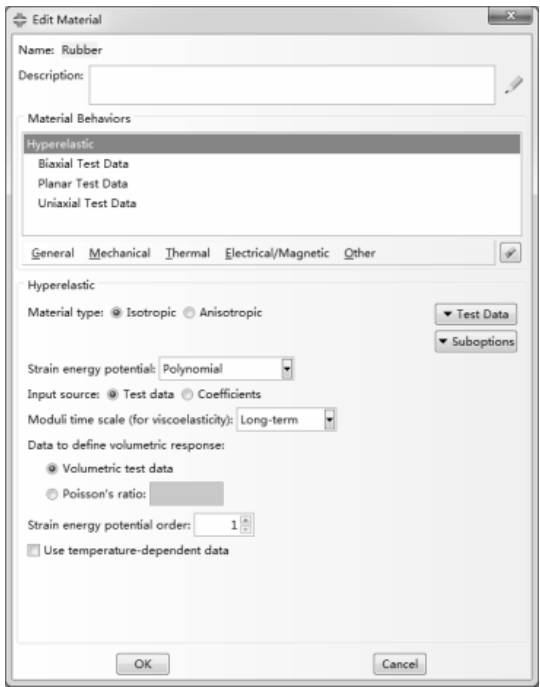


图 5-98 “编辑材料”对话框

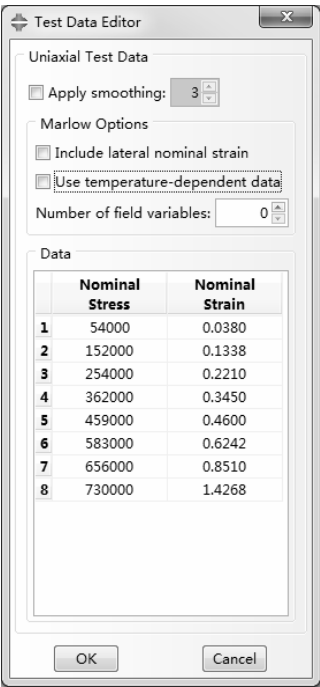


图 5-99 输入单轴试验数据

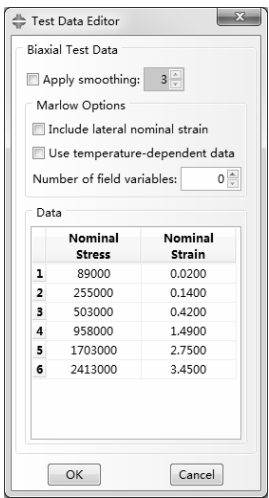


图 5-100 输入双轴实验数据

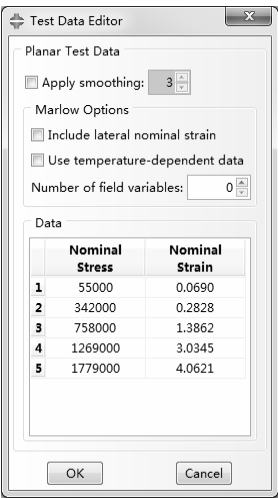


图 5-101 输入平面试验数据

以同样的方式，创建名为 Steel 的线弹性材料，其弹性模量为 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ ，泊松比为 0.3。

(2) 创建截面

单击  Create Section 按钮，弹出如图 5-102 所示的 Create Section（创建截面）对话框，输入名称，将界面类型定义为 Solid, Homogeneous（实体、均质），单击 Continue... 按钮后，在弹出的如图 5-103 所示的 Edit Section（编辑截面）对话框中选择对应的材料。

(3) 指派截面

单击  Assign Section（截面指派）按钮，进行截面指派，分别如图 5-104、图 5-105 所示。

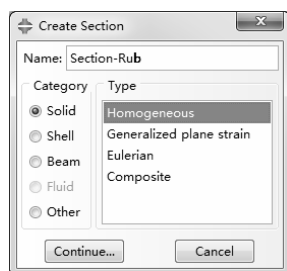


图 5-102 “创建截面”对话框

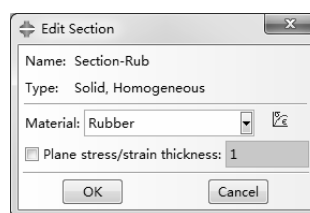


图 5-103 “编辑截面”对话框

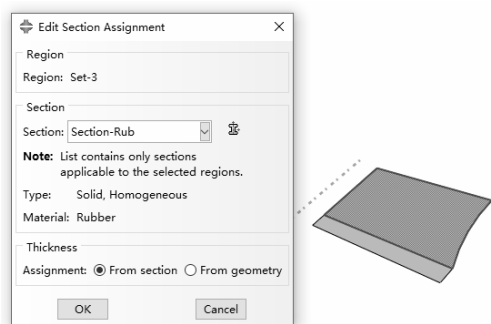


图 5-104 指派橡胶材料

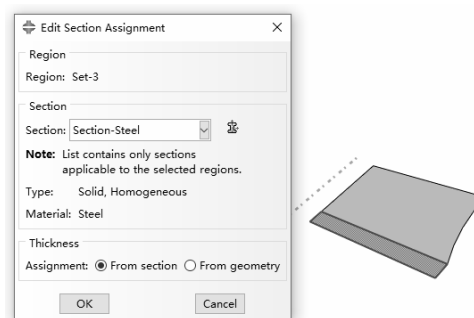


图 5-105 指派钢材料

3. 实例化

进入 Assembly（装配）模块，单击  Create Instance（创建实例）按钮，弹出如图 5-106 所示的 Create Instance（创建实例）对话框，选择对应部件，完成部件的实例化，如图 5-107 所示。

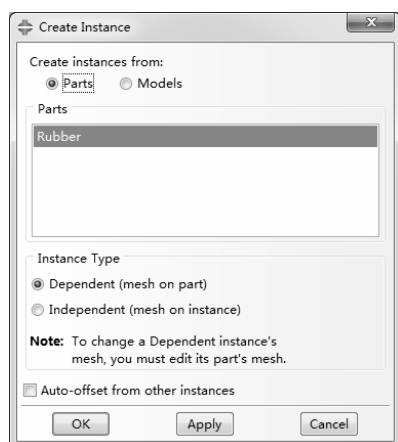


图 5-106 “创建实例”对话框



图 5-107 部件实例化

4. 分析步

(1) 创建分析步

进入 Step（分析步）模块，单击  Create Step（创建分析步）按钮，弹出如图 5-108 所示的对话框，输入分析步名称，选择 Static, General（通用静力）分析步，单击 Continue... 按钮后弹出如图 5-109 所示的 Edit Step（编辑分析步）对话框，在 Nlgeom（几何非线性）选项处点选 On 单选按钮，在 Incrementation（增量）选项卡中，设置初始时间增量为 0.01，单击 OK 按钮完成分析步设置。

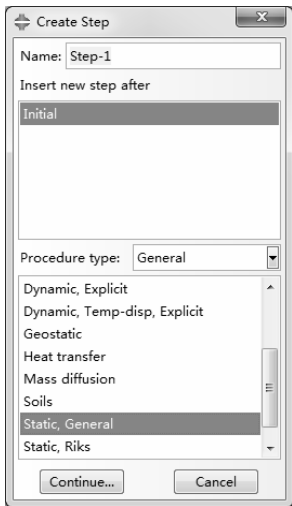


图 5-108 “创建分析步”对话框

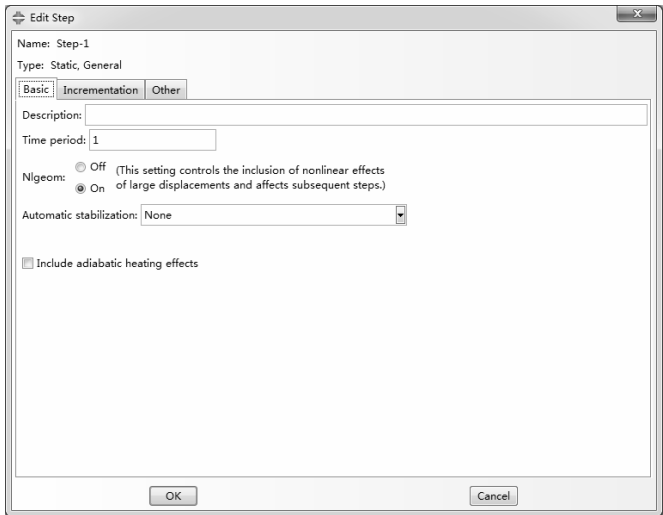


图 5-109 “编辑分析步”对话框

(2) 编辑场输出请求

单击  Field Output Manager（场输出管理器）按钮，弹出如图 5-110 所示的 Field Output Requests Manager（场输出请求管理器）对话框，单击 Edit...（编辑...）按钮，弹出如图 5-111 所示的 Edit Field Output Request（编辑场输出请求）对话框，并按照图中设置输出请求。

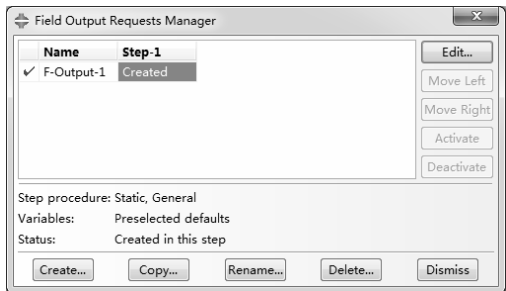


图 5-110 “场输出请求管理器”对话框

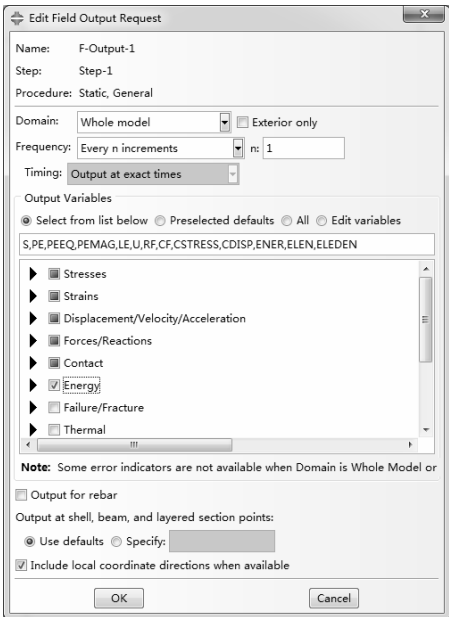


图 5-111 “编辑场输出请求”对话框

5. 载荷与边界条件

(1) 施加载荷

进入 Load 模块，单击  Create Load 按钮，弹出如图 5-112 所示的 Create Load（创建载荷）对话框，创建一个 Pressure（压强）类型的载荷，并按照图 5-113 中的数据进行设置。

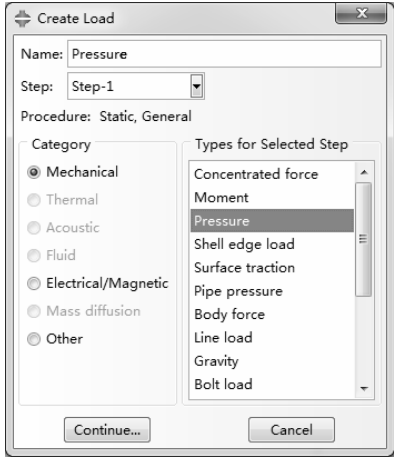


图 5-112 “创建载荷”对话框

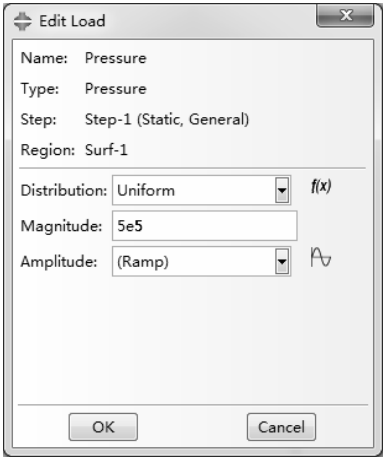


图 5-113 编辑载荷

(2) 施加边界条件

单击  Create Boundary Condition（创建边界条件）按钮，弹出如图 5-114 所示的 Create Boundary Condition（创建边界条件）对话框，选择 Mechanical（力学）、Symmetry/AntiSymmetry/Encastre（对称/反对称/完全固定）类型，拾取模型的上边线，确认后弹出如图 5-115 所示的 Create Boundary Condition（编辑边界条件）对话框，点选 YSYMM(U2=UR1=UR3=0)单选按钮，单击 OK 按钮完成设置。

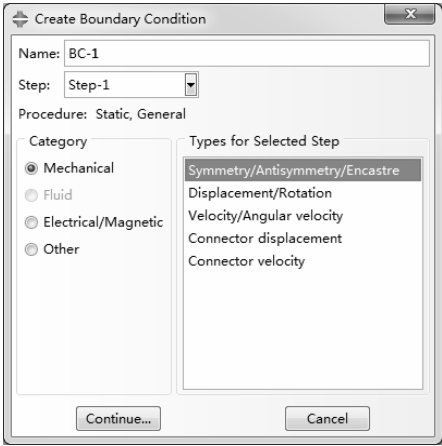


图 5-114 “创建边界条件”对话框

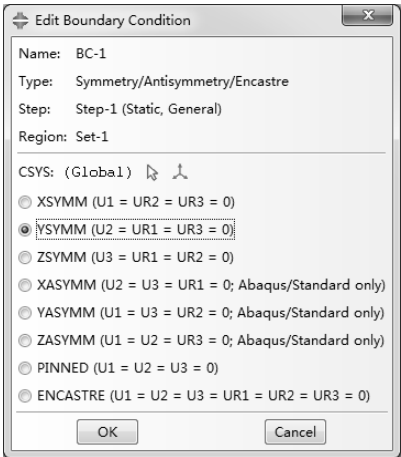


图 5-115 “编辑边界条件”对话框

6. 网格划分

进入 Mesh 模块，单击  Seed Edges（局部种子）按钮，弹出如图 5-116 所示的 Local Seeds（局部种子）对话框，对模型实例的所有边进行布种。其中，所有的水平边均布种单元数量为 30，橡胶垫部分竖边布种单元数为 30，钢板部分竖边布种单元数量为 1，布种完成如图 5-117 所示。

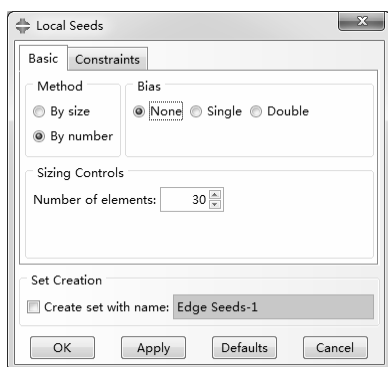


图 5-116 “局部种子”对话框

单击 Assign Mesh Controls (指派网格控制) 按钮, 拾取两个分区, 单击 Continue... 按钮后, 弹出如图 5-118 所示的 Mesh Controls (网格控制属性) 对话框, 选择 Technique 类型为 Structured (结构网格), 单击 OK 按钮完成设置。

单击 Assign Element Type (指派单元类型) 按钮, 选定橡胶部分分区, 单击 Continue... 按钮后弹出如图 5-119 所示的 Element Type (单元类型) 对话框, 选择 CAX4H 型单元。重复该操作, 对钢板部分分区选择 CAX4I 型单元, 如图 5-120 所示。

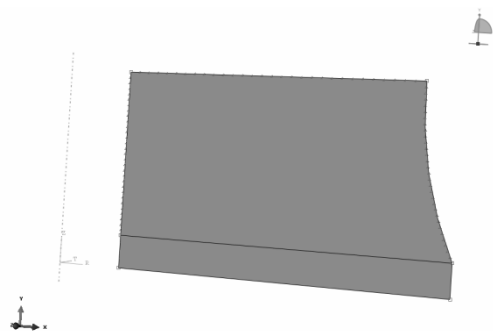


图 5-117 完成布种

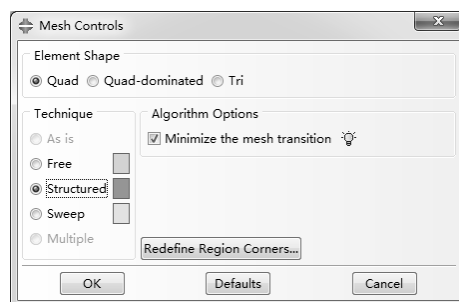


图 5-118 “网格控制属性”对话框

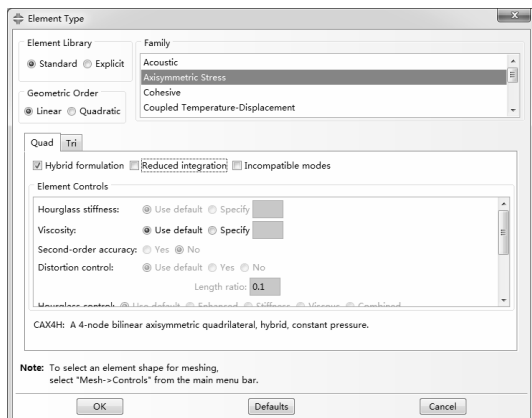


图 5-119 “单元类型”对话框

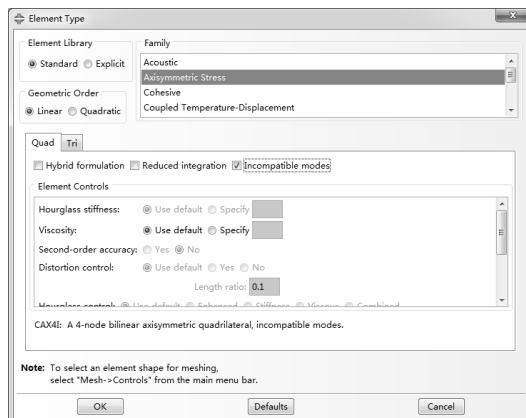


图 5-120 非协调模式单元

单击 Mesh Part Instance (网格划分) 按钮, 完成网格划分, 如图 5-121 所示。

7. 分析作业

进入 Job 模块, 单击 Create Job (创建作业) 按钮, 弹出如图 5-122 所示的 Create Job (创建作业) 对话框, 输入作业名称, 单击 Continue... 按钮, 在弹出的图 5-123 所示的 Edit Job (编辑作业) 对话框中单击 OK 按钮, 完成创建。

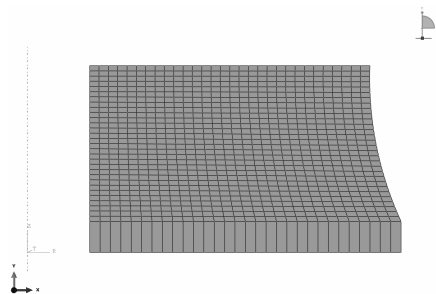


图 5-121 完成网格划分

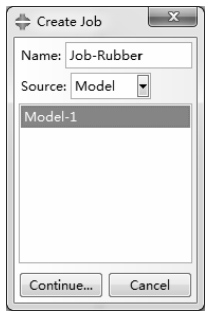


图 5-122 “创建作业”对话框

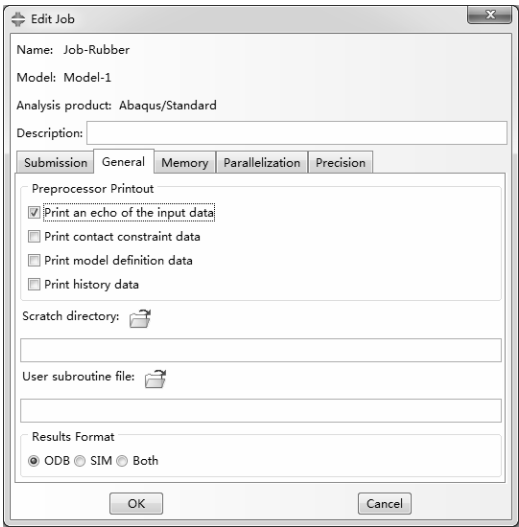


图 5-123 “编辑作业”对话框

8. 后处理

分析作业完成后，单击  Field Output Dialog 按钮，选择需要输出的变量，单击 Apply（应用）按钮，可在视图区输出不同的云图，如图 5-124～图 5-139 所示。

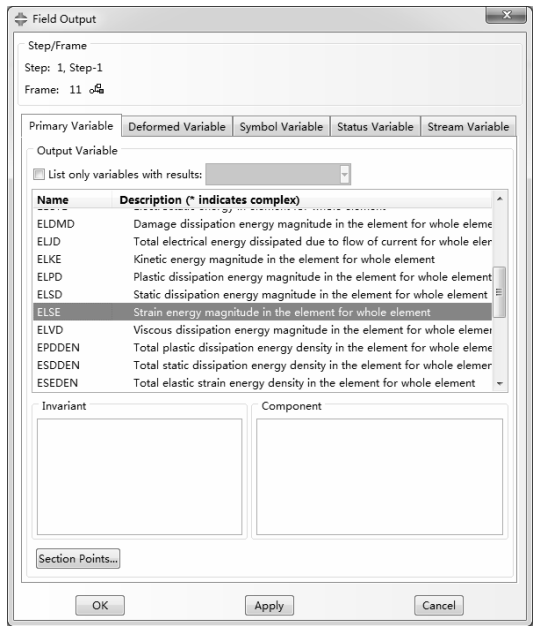


图 5-124 选择应变能

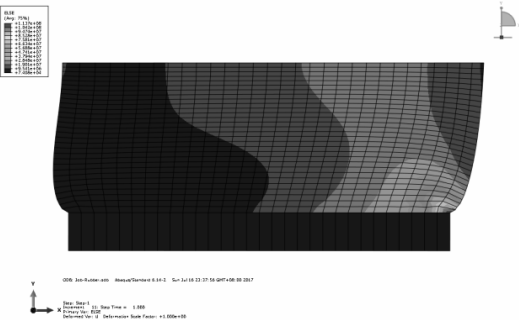


图 5-125 应变能云图

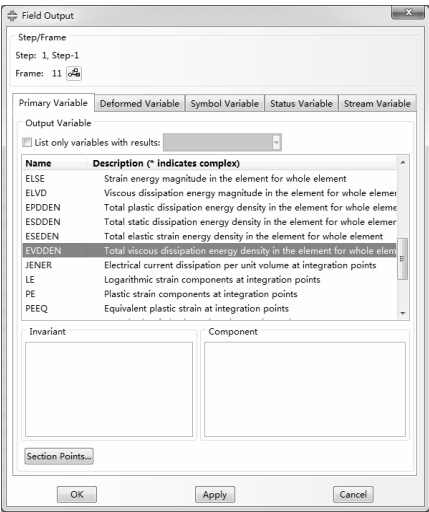


图 5-126 选择弹性应变能密度

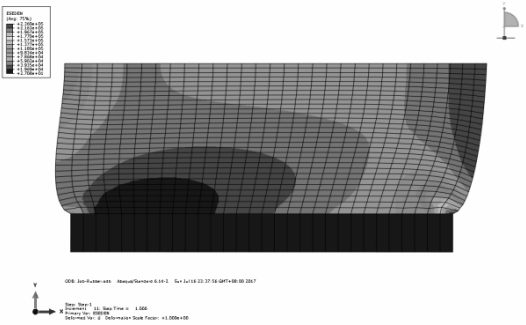


图 5-127 弹性应变能密度云图

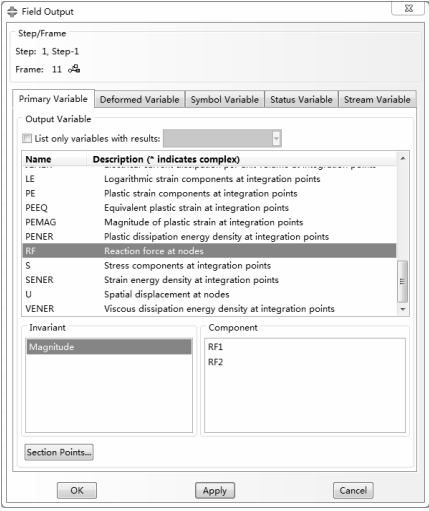


图 5-128 选择反作用力

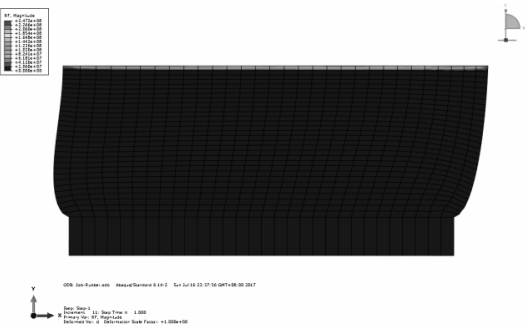


图 5-129 反作用力云图

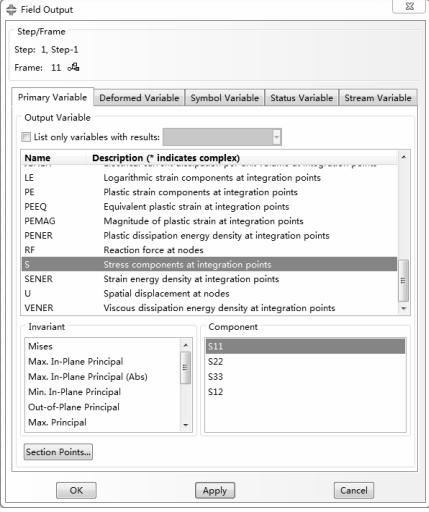


图 5-130 选择积分点应力分量

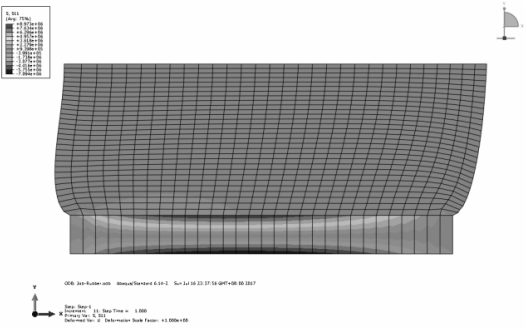


图 5-131 第一主应力云图

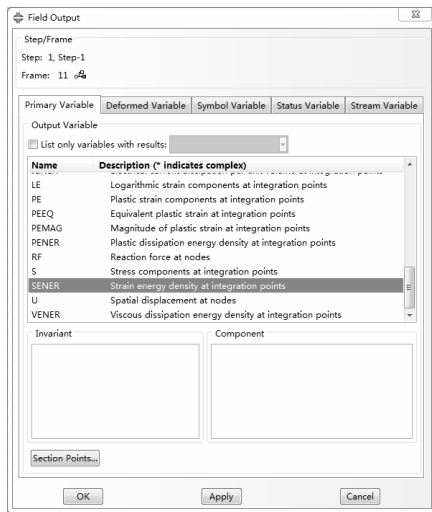


图 5-132 积分点处应变能密度

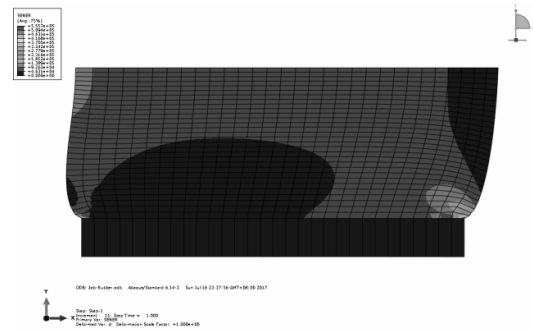


图 5-133 积分点处的应变能密度云图

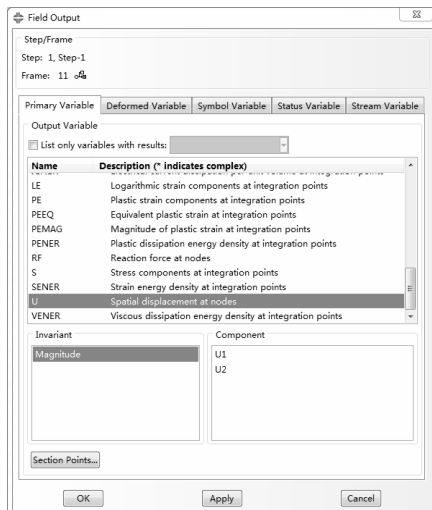


图 5-134 选择空间位移

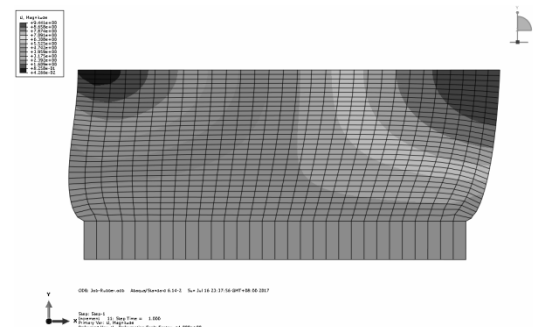


图 5-135 节点位移云图

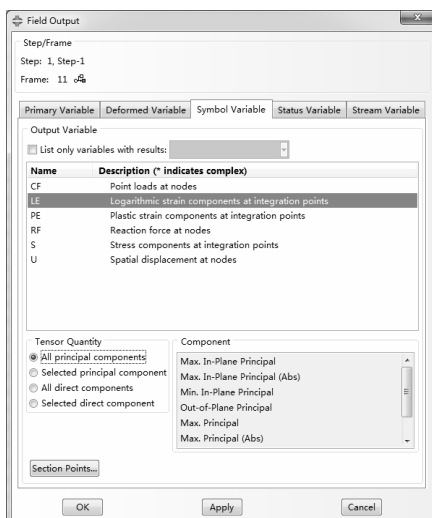


图 5-136 选择对数应变分量

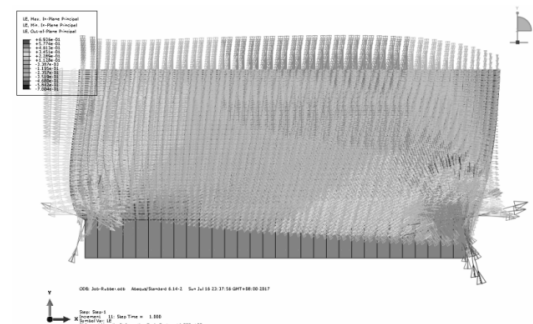


图 5-137 对数应变分量符号图

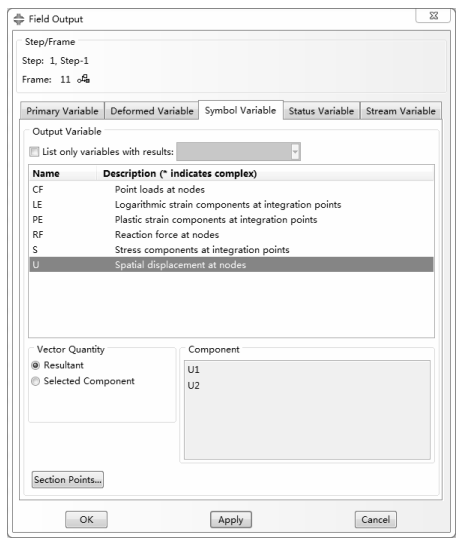


图 5-138 选择符号变量下变形

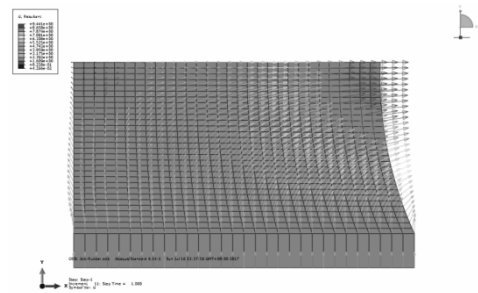


图 5-139 变形符号图

5.5 本章小结

线性静力学问题的求解难度较低，因此用户更关注于计算的精度和求解的效率，其关键在于网格的划分，包括种子的布置、网格控制和单元类型的选取。

结构问题中有三种导致非线性的因素：材料、几何和边界（接触）。非线性问题是利用 Newton-Raphson 法来进行迭代求解的，因此求解非线性问题比线性问题所需要的计算机资源多很多倍。