

承受中心点载荷的球形盖

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。

简介

屈曲是一种会导致结构突然失效的现象。线性屈曲分析可以预测临界屈曲载荷，不过，这种分析不会给出任何有关在高于临界载荷的载荷下会发生什么情况的信息。追踪高于临界载荷情况下的解称为*后屈曲分析*。

盖冠承受点载荷的球形盖是研究二维轴对称壳屈曲后分析的常见示例。临界载荷、突跳现象、软化和硬化效应是本例研究的重点方面。

为了预测后屈曲特性，需要使用非线性求解器并逐步增加外加载荷来计算结构变形。然后，可以根据何时达到某种不可接受的变形来确定屈曲载荷。

一旦达到临界屈曲载荷，结构可能会突然发生大变形，变成新的稳定构型，这称为“突跳现象”。由于此问题变为数值奇异性问题，因此，在标准非线性静态求解器中，使用指定载荷并不总是能够模拟突跳现象。本例中，即使载荷在快速通过区域的临界点之后减小，盖冠的位移也会单调增加，因此，对于本例，使用位移控制是一个有用的策略。

模型定义

这里研究的模型是盖冠受点载荷作用的球形盖基准模型；参见参考资料 1。

- 球形盖的半径为 $a = 10$ m，厚度为 $th = 0.20384$ m，扇形角为 π/4 弧度。
- 不在旋转轴上的边 / 点是固定的。
- 在此研究中，我们分析盖冠 （中心）轴向位移相对于外加载荷的变化。

由于轴对称，仅对帽中位于正坐标的部分进行建模。带有载荷和边界条件的球形盖的完整几何形状如图 1 所示。

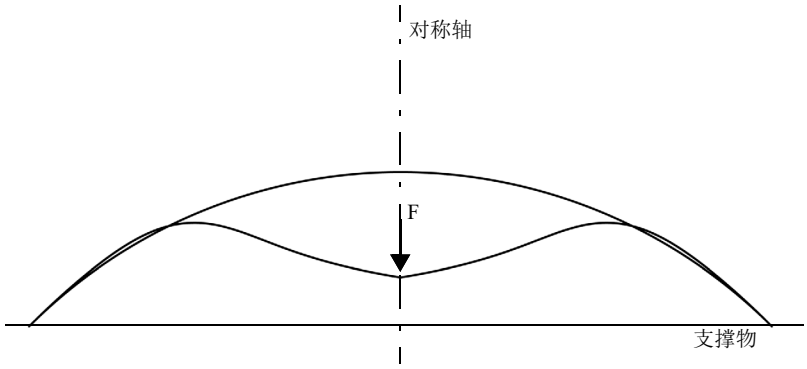


图 1：问题描述。

结果

对于球形盖，载荷与位移的关系曲线显示出临界载荷，接着是渐进跳跃，和刚度的进一步增加。图 2 和图 3 分别显示了 “固体力学” 接口和 “壳” 接口中三个不同冠位移

下的总位移。图中的标注显示了与参考资料 1 中给出的基准数值解非常匹配的相应点载荷。

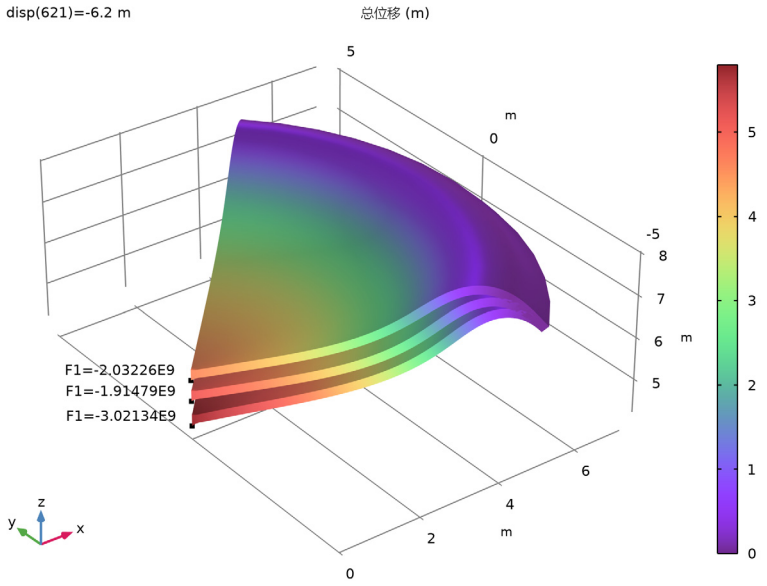


图 2：使用 40 个网格单元在 “固体力学” 接口中计算的总位移。

图中值得注意的是临界载荷后的突跳现象和软化效应。两个图中的顶面对应于临界载荷，而中面对应于临界点之后的载荷。这表明，尽管变形幅度增大，但在临界载荷后，载荷由于软化而减小。两个图中的第三个表面都显示了位移随载荷的增加而增大，表明在突跳阶段后刚度增大。

图 4 显示了球形盖冠的轴向位移随外加载荷的变化。对于 “壳” 接口，使用三种不同的离散化 （4、 8、 16 个网格单元）。对于 “固体力学” 接口，使用 40 个网格单元。这些离散化与参考资料 1 中的相同。

结果与参考资料中的值非常接近。但是请注意，这些结果是针对某些离散化和单元公式而报告的，实际并没有这样的目标值。

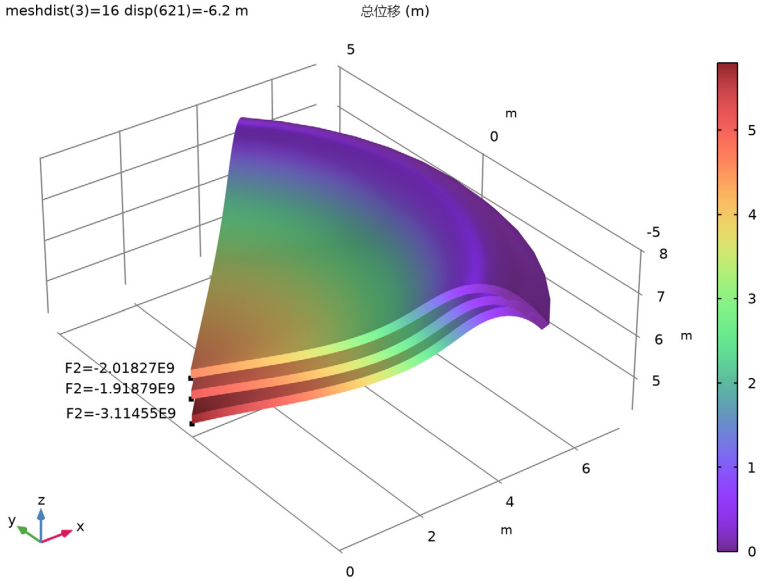


图 3：用 16 个网格单元在“壳”接口中计算的总位移。

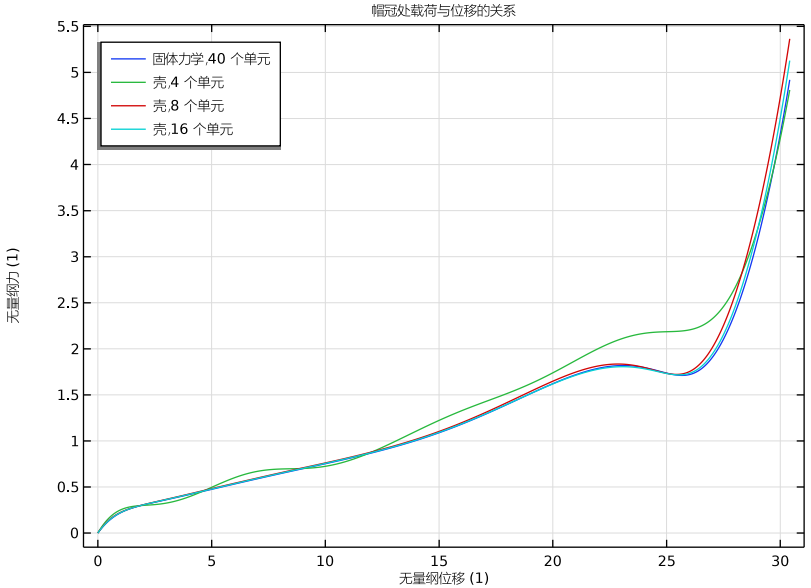


图 4：外加载荷与中心位移的关系。

表格 1 将带有 40 个网格单元的“固体力学”接口的结果与参考资料进行了比较。

表格 1：无量纲固体力学。

外加载荷	参考资料中的位移	计算出的位移
0.320	2.165	2.250
0.584	6.769	6.920
0.975	13.335	13.600
1.624	19.706	20.025
1.808	22.073	22.450
1.758	24.398	24.665
1.962	26.788	27.170
4.699	29.851	30.265

表格 2、表格 3 和表格 4 将分别具有 4、8 和 16 个网格单元的“壳”接口的结果与参考资料进行了比较。请注意，只有四个单元，没有突跳现象，这表明网格非常粗化。参考资料中也有这种情况，即便使用不同类型的壳单元公式也是如此。

表格 2：“壳”接口所得结果包含 4 个无量纲单元。

外加载荷	目标位移	计算出的位移
0.335	2.367	3.100
0.579	6.921	5.940
0.920	11.614	12.665
1.176	16.423	14.850
1.705	18.964	20.300
2.488	21.393	27.850
2.540	23.659	28.050
3.765	28.541	29.870

表格 3：“壳”接口所得结果包含 8 个无量纲单元。

外加载荷	目标位移	计算出的位移
0.332	2.326	2.440
0.580	6.720	6.775
0.994	13.642	13.760
1.502	18.487	18.815
1.757	20.887	21.240
1.678(1.722)	25.668	25.500
3.705	28.680	29.330

表格 4：“壳”接口所得结果包含 16 个无量纲单元。

外加载荷	目标位移	计算出的位移
0.332	2.326	2.445
0.580	6.720	6.800
0.994	13.642	13.800
1.502	18.487	18.945
1.757	20.887	21.640
1.678(1.717)	25.668	25.500
3.705	28.680	29.410

请注意，当使用壳公式时，临界载荷后的最低载荷在参考资料中为 1.678。在仿真解中没有达到此值，其中预测的最低载荷分别为 1.722 和 1.717，分别包含 8 个和 16 个单

元。完善的“固体力学”模型实际上表明，这里计算出的结果比参考资料中报告的值更加精确。

COMSOL 软件功能实现说明

模型的主要特点是在屈曲载荷下出现极限点不稳定的情况。载荷控制无法跟踪极限点之后的不稳定解路径，因此使用位移控制，这是因为冠处的位移单调增加。

在这种情况下，当唯一的载荷是点载荷时，可以直接指定该点的位移，然后测量反作用力。如果载荷较复杂 （例如压力载荷），上述方法不可行。因此这里介绍一种更通用的方法。

采用位移控制策略时，将盖冠处的点载荷视为全局自由度，并求解盖冠处轴向位移的全局方程，得到点载荷值。

对于存在突跳现象的非线性问题，没有通用的方法来确定使用哪个控制参数，因此需要运用一定的物理洞察力。您需要找到一个单调增加的量用作控制参数。

参考资料

1. P. Lyons and S. Holsgrove, *Finite Element Benchmarks For 2D Beams And Axisymmetric Shells Involving Geometric Non-Linearity,* NAFEMS, 2005.

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

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 **二维轴对称**。

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 在**选择物理场**树中选择**结构力学** > **壳 (shell)**。

5 单击**添加**。

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
a	10[m]	10 m	帽半径
th	0.203840[m]	0.20384 m	帽厚度
EE	210e9[Pa]	2.1E11 Pa	杨氏模量
Nu	0.3	0.3	泊松比
Rho	7800	7800	密度
disp	0[m]	0 m	位移参数
meshdist	4	4	网格分布参数

定义一组在后处理绘图和计算中有用的无量纲变量。

定义

变量 1

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

2 在**变量**的**设置**窗口中，定位到**变量**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
Fn1	-F1*a/(EE*th^3*2*pi)		无量纲力
wn1	-w/th		无量纲位移
Fn2	-F2*a/(EE*th^3*2*pi)		无量纲力
wn2	-w2/th		无量纲位移

几何 1

圆 1 (c1)

1 在**几何**工具栏中单击 **圆**。

2 在**圆**的**设置**窗口中，定位到**对象类型**栏。

3 从**类型**列表中选择**曲线**。

4 定位到**大小和形状**栏。在**扇形角**文本框中键入 “45”。

5 在**半径**文本框中键入 “a+th”。

6 单击 **构建选定对象**。

7 定位到**旋转角度**栏。在**旋转**文本框中键入 “45”。

8 单击以展开**层**栏。在表中输入以下设置：

层名称	厚度 (m)
层 1	th

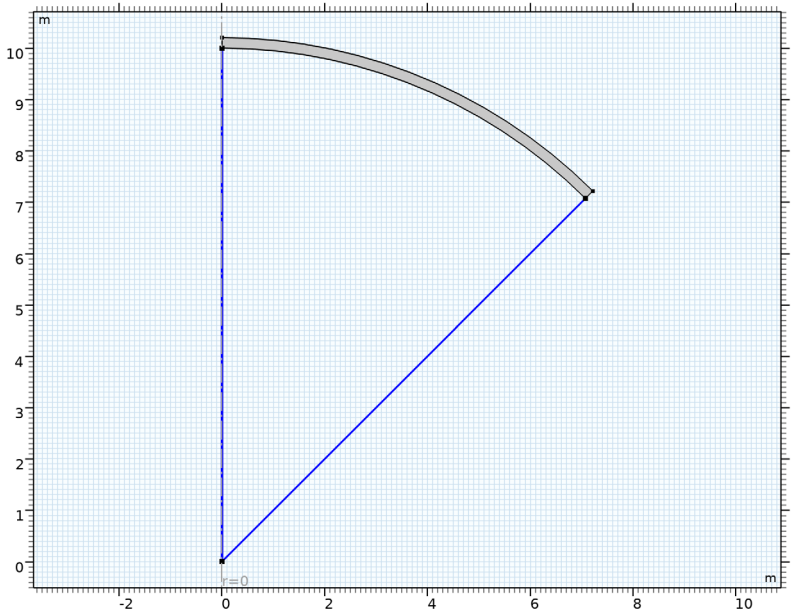
9 单击 **构建选定对象**。

删除实体 1 (del1)

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**几何 1** 并选择**删除实体**。

2 在对象 **c1** 中，选择 “边界” 1 和 2。

3 在**图形**工具栏中单击 **缩放到窗口大小**按钮。



4 在**删除实体**的**设置**窗口中，单击 **构建选定对象**。

通过**固体力学**和**壳**接口的材料链接添加相同的材料。

全局定义

材料 1 (mat1)

在**模型开发器**窗口的**全局定义**节点下，右键单击**材料**并选择**空材料**。

材料

材料链接 1 (matlnk1)

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**更多材料** > **材料链接**。

材料链接 2 (matlnk2)

1 右键单击**材料**并选择**更多材料** > **材料链接**。

2 在**材料链接**的**设置**窗口中，定位到**几何实体选择**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 选择 “边界” 3。

使用**选择列表**窗口可以更轻松地选择正确的边界。要打开此窗口，请在**主屏幕**工具栏中单击**窗口**，然后选取**选择列表**。（如果您正在运行跨平台桌面，可以在主菜单中找到**窗口**。）

全局定义

材料 1 (mat1)

1 在**模型开发器**窗口的**全局定义** > **材料**节点下，单击**材料 1 (mat1)**。

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	EE	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	Nu	1	杨氏模量和泊松比
密度	rho	Rho	kg/m³	基本

定义

积分 1 (intop1)

1 在**定义**工具栏中单击 **非局部耦合**，然后选择**积分**。

2 在**积分**的**设置**窗口中，定位到**源选择**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**点**。

4 选择 “点” 1。

5 定位到**高级**栏。从**方法**列表中选择**在节点上求和**。

固体力学 (SOLID)

固定约束 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**固定约束**。

2 选择 “边界” 2。

接下来，为点载荷添加一个全局方程，使帽冠位移等于指定值。为此，需要启用 “基于方程的贡献”。

3 在**模型开发器**工具栏中单击 **显示更多选项**按钮。

4 在**显示更多选项**对话框中，在树中，选中**物理场** > **基于方程的贡献**节点的复选框。

5 单击**确定**。

全局方程 1 (ODE1)

1 在**物理场**工具栏中单击 **全局**，然后选择**全局方程**。

2 在**全局方程**的**设置**窗口中，定位到**全局方程**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	f(u,ut,utt,t) (1)	初始值 (u_0) (1)	初始值 (u_t0) (1/s)	描述
F1	intop1(w)-disp	0	0	

4 定位到**单位**栏。单击 **选择因变量物理量**。

5 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “力”。

6 在模型树中选择**常规** > **力 (N)**。

7 单击**确定**。

8 在**全局方程**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。

9 单击 **选择源项物理量**。

10 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “位移”。

11 在模型树中选择**常规** > **位移 (m)**。

12 单击**确定**。

点载荷 （轴上）1

1 在**物理场**工具栏中单击 **点**，然后选择**点载荷 （轴上）**。

2 选择 “点” 1。

3 在**点载荷 （轴上）**的**设置**窗口中，定位到**力**栏。

4 从 F_z 列表中选择**状态变量 F1 (solid)**。

壳 (SHELL)

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**壳 (shell)**。

2 在**壳**的**设置**窗口中，定位到**边界选择**栏。

3 单击 **清除选择**。

4 选择 “边界” 3。

为了使用 “壳” 接口为实体中面建模，需使用**厚度和偏移**特征指定适当的偏移量。壳法向指向内部，这可以在后处理图中验证。

厚度和偏移 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **壳 (shell)** 节点下，单击**厚度和偏移 1**。

2 在**厚度和偏移**的**设置**窗口中，定位到**厚度和偏移**栏。

3 在 d_0 文本框中键入 “th”。

4 从**位置**列表中选择**顶面在边界**。

固定约束 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **点**，然后选择**固定约束**。

2 选择 “点” 3。

全局方程 1 (ODE2)

1 在**物理场**工具栏中单击 **全局**，然后选择**全局方程**。

2 在**全局方程**的**设置**窗口中，定位到**全局方程**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	f(u,ut,utt,t) (1)	初始值 (u_0) (1)	初始值 (u_t0) (1/s)	描述
F2	intop1(w2)-disp	0	0	

4 定位到**单位**栏。单击 **选择因变量物理量**。

5 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “力”。

6 在模型树中选择**常规** > **力 (N)**。

7 单击**确定**。

8 在**全局方程**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。

9 单击 **选择源项物理量**。

10 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “位移”。

11 在模型树中选择**常规** > **位移 (m)**。

12 单击**确定**。

点载荷 （轴上）1

1 在**物理场**工具栏中单击 **点**，然后选择**点载荷 （轴上）**。

2 选择 “点” 1。

3 在**点载荷 （轴上）**的**设置**窗口中，定位到**力**栏。

4 从 F_z 列表中选择**状态变量 F2 (shell)**。

使用不同的**网格**节点，以便对基准示例中给出的 “固体力学” 和 “壳” 接口使用不同的离散化。

网 格 2

在**网格**工具栏中单击**添加网格**，然后选择**添加网格**。

网格：固体力学

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **网格**节点下，单击**网格 1**。

2 在**网格**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “网格：固体力学”。

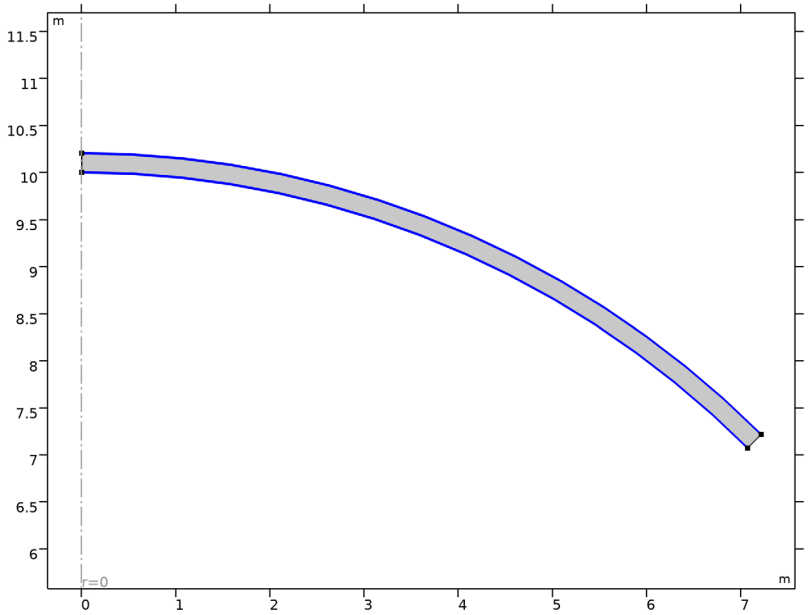
映射 1

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 选择 “边界” 3 和 4。



3 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。

4 在**单元数**文本框中键入 “40”。

5 单击 **构建选定对象**。

网格：壳

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **网格**节点下，单击**网格 2**。

2 在**网格**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “网格：壳”。

边 1

1 在**网格**工具栏中单击 **更多生成器**，然后选择**边**。

2 选择 “边界” 3。

分布 1

1 右键单击**边 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 “meshdist”。

4 单击 **构建选定对象**。

向**固体力学**接口添加稳态研究。

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 找到**研究中的物理场接口**子栏。在表格中，清除**壳 (shell)** 的**求解**复选框。

5 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

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

固体力学

在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “固体力学”。

步骤 1：稳态

1 在**模型开发器**窗口的**固体力学**节点下，单击**步骤 1： 稳态**。

2 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 选中**包含几何非线性**复选框。

4 单击以展开**网格选择**栏。在表中输入以下设置：

组件	网格
几何 1	网格：固体力学

5 单击以展开**研究扩展**栏。选中**辅助扫描**复选框。

6 单击 **添加**。

7 在表中输入以下设置：

参数名称	参数值列表	参数单位
disp (位移参数)	range(0,-0.01,-6.2)	m

8 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

向**壳**接口添加稳态研究。使用参数化扫描将网格离散化参数化。

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 找到**研究中的物理场接口**子栏。在表格中，清除**固体力学 (solid)** 的**求解**复选框。

5 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

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

研究：壳

在**研究**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “研究：壳”。

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
meshdist (网格分布参数)	4,8,16	

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**研究设置**栏。

3 选中**包含几何非线性**复选框。

4 定位到**研究扩展**栏。选中**辅助扫描**复选框。

5 单击 **添加**。

6 在表中输入以下设置：

参数名称	参数值列表	参数单位
disp (位移参数)	range(0,-0.01,-6.2)	m

7 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

结 果

二维旋转

1 在**模型开发器**窗口中展开**结果** > **数据集**节点，然后单击**二维旋转**。

2 在**二维旋转**的**设置**窗口中，单击以展开**旋转层**栏。

3 在**起始角度**文本框中键入 “45”。

4 在**旋转角度**文本框中键入 “-90”。

二维旋转 2

1 在**模型开发器**窗口中，单击**二维旋转 2**。

2 在**二维旋转**的**设置**窗口中，定位到**旋转层**栏。

3 在**起始角度**文本框中键入 “45”。

4 在**旋转角度**文本框中键入 “-90”。

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**绘图设置**栏。

3 从**坐标系**列表中选择**材料 (R, PHI, Z)**。

为了将临界点之后的软化和硬化效应可视化，生成临界点处以及临界点之后平衡路径的不稳定和稳定部分球形帽的三维位移图。

总位移，三维 （实体）

1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**应力 , 3D (solid)**。

2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “总位移，三维 （实体）”。

3 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**手动**。

4 在**标题**文本区中键入 “总位移 (m)”。

5 定位到**绘图设置**栏。清除**绘制数据集的边**复选框。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**总位移，三维 （实体）**节点，然后单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**二维旋转**。

4 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-4.7**。

5 定位到**表达式**栏。在**表达式**文本框中键入 “solid.disp”。

6 定位到**着色和样式**栏。从**颜色表**列表中选择 **SpectrumLight**。

标注 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**表面 1** 节点。

2 右键单击**总位移，三维 （实体）**并选择**标注**。

3 在**标注**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

4 从**数据集**列表中选择**二维旋转**。

5 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-4.7**。

6 定位到**标注**栏。在**文本**文本框中键入 “`F1=eval(F1)`”。

7 从**几何层**列表中选择**全局**。

8 定位到**位置**栏。在 **Z** 文本框中键入 “`a-4.7`”。

9 单击以展开**高级**栏。定位到**着色和样式**栏。从**锚点**列表中选择**右下角**。

表面 2

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （实体）**节点下，右键单击**表面 1** 并选择**复制粘贴**。

标注 2

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （实体）**节点下，右键单击**标注 1** 并选择**复制粘贴**。

表面 2

1 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

2 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.2**。

3 单击以展开**继承样式**栏。从**绘图**列表中选择**表面 1**。

标注 2

1 在**模型开发器**窗口中，单击**标注 2**。

2 在**标注**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.2**。

4 定位到**位置**栏。在 **Z** 文本框中键入 “`a-5.2`”。

表面 3

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （实体）**节点下，右键单击**表面 2** 并选择**复制粘贴**。

标注 3

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （实体）**节点下，右键单击**标注 2** 并选择**复制粘贴**。

表面 3

1 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

2 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.8**。

标注 3

1 在**模型开发器**窗口中，单击**标注 3**。

2 在**标注**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.8**。

4 定位到**位置**栏。在 **Z** 文本框中键入 “a-5.8”。

5 在**总位移，三维 （实体）**工具栏中单击 **绘制**。

6 在**图形**工具栏中单击 **缩放到窗口大小**按钮。

应力 (shell)

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

2 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**绘图设置**栏。

3 从**坐标系**列表中选择**材料 (R, PHI, Z)**。

总位移，三维 （壳）

1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**应力 , 3D (shell)**。

2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “总位移，三维 （壳）”。

3 定位到**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**手动**。

4 在**标题**文本区中键入 “总位移 (m)”。

5 定位到**绘图设置**栏。清除**绘制数据集的边**复选框。

表面 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**总位移，三维 （壳）**节点，然后单击**表面 1**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**二维旋转 2**。

4 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-4.7**。

5 定位到**表达式**栏。在**表达式**文本框中键入 “shell.disp”。

6 定位到**着色和样式**栏。从**颜色表**列表中选择 **SpectrumLight**。

标注 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**表面 1** 节点。

2 右键单击**总位移，三维 （壳）**并选择**标注**。

3 在**标注**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

4 从**数据集**列表中选择**二维旋转 2**。

5 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-4.7**。

6 定位到**标注**栏。在**文本**文本框中键入 “`F2=eval(F2)`”。

7 从**几何层**列表中选择**全局**。

8 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入 “`a-4.7`”。

9 定位到**着色和样式**栏。从**锚点**列表中选择**右下角**。

表面 2

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （壳）**节点下，右键单击**表面 1** 并选择**复制粘贴**。

标注 2

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （壳）**节点下，右键单击**标注 1** 并选择**复制粘贴**。

表面 2

1 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

2 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.2**。

3 定位到**继承样式**栏。从**绘图**列表中选择**表面 1**。

标注 2

1 在**模型开发器**窗口中，单击**标注 2**。

2 在**标注**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.2**。

4 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入 “`a-5.2`”。

表面 3

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （壳）**节点下，右键单击**表面 2** 并选择**复制粘贴**。

标注 3

在**模型开发器**窗口的**结果** > **总位移，三维 （壳）**节点下，右键单击**标注 2** 并选择**复制粘贴**。

表面 3

1 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

2 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.8**。

标注 3

1 在**模型开发器**窗口中，单击**标注 3**。

2 在**标注**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**参数值 (disp (m))** 列表中选择 **-5.8**。

4 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入 “a-5.8”。

5 在**总位移，三维 （壳）**工具栏中单击 **绘制**。

6 在**图形**工具栏中单击 **缩放到窗口大小**按钮。

显示壳厚度和法向方向。

结 果 模 板

1 在**结果**工具栏中，单击 **结果模板**以打开**结果模板**窗口。

2 转到**结果模板**窗口。

3 在模型树中选择**研究：壳 / 参数化解 1 (sol3) > 壳 > 厚度和方向 (shell)**。

4 单击窗口工具栏中的**添加结果模板**。

5 在**结果**工具栏中，单击 **结果模板**以关闭**结果模板**窗口。

结 果

厚度和方向 (shell)

为了在**厚度和方向**图中更好地显示壳法向，可以减少箭头数量。

壳局部坐标系

1 在**模型开发器**窗口中展开**厚度和方向 (shell)** 节点，然后单击**壳局部坐标系**。

2 在**线坐标系**的**设置**窗口中，定位到**定位**栏。

3 在**点数**文本框中键入 “20”。

4 在**厚度和方向 (shell)** 工具栏中单击 **绘制**。

绘制一条一维曲线，显示轴向位移与帽冠处点载荷之间的关系。

帽冠处载荷与位移的关系

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 “帽冠处载荷与位移的关系”。

3 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**手动**。

4 在**标题**文本区中键入 “帽冠处载荷与位移的关系”。

5 定位到**图例**栏。从**位置**列表中选择**左上角**。

点结果图 1

1 右键单击**帽冠处载荷与位移的关系**并选择**点结果图**。

2 选择 “点” 1。

3 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

4 在**表达式**文本框中键入 “Fn1”。

5 定位到 **x 轴数据**栏。从**参数**列表中选择**表达式**。

6 在**表达式**文本框中键入 “wn1”。

7 单击以展开**图例**栏。选中**显示图例**复选框。

8 从**图例**列表中选择**手动**。

9 在表中输入以下设置：

图例
固体力学，40 个单元

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**研究：壳 / 参数化解 1 (sol3)**。

4 定位到 **y 轴数据**栏。在**表达式**文本框中键入 “Fn2”。

5 定位到 **x 轴数据**栏。在**表达式**文本框中键入 “wn2”。

6 定位到**图例**栏。从**图例**列表中选择 **eval 函数结果**。

7 在**图例**文本框中键入 “壳，eval(meshdist) 个单元”。

8 在**帽冠处载荷与位移的关系**工具栏中单击 **绘制**。

帽冠处载荷与位移的关系

1 在**结果**工具栏中单击 **计算组**。

2 在**计算组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “帽冠处载荷与位移的关系”。

固体力学，40 个单元

1 右键单击**帽冠处载荷与位移的关系**并选择**点计算**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “固体力学，40 个单元”。

3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**固体力学 / 解 1 (sol1)**。

4 选择 “点” 1。

5 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
disp	m	位移参数
Fn1	1	无量纲力 （固体力学， 40 个单元）
wn1	1	无量纲位移 （固体力学， 40 个单元）

壳， 4 个单元

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**帽冠处载荷与位移的关系**并选择**点计算**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “壳， 4 个单元”。

3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**研究：壳 / 参数化解 1 (sol3)**。

4 从**参数选择 (meshdist)** 列表中选择**来自列表**。

5 从**参数值 (meshdist)** 列表中选择 **4**。

6 选择 “点” 1。

7 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
Fn2	1	无量纲力 （壳， 4 个单元）
wn2	1	无量纲位移 （壳， 4 个单元）

壳， 8 个单元

1 右键单击**壳， 4 个单元**并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “壳， 8 个单元”。

3 定位到**数据**栏。从**参数值 (meshdist)** 列表中选择 **8**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
Fn2	1	无量纲力 （壳， 8 个单元）
wn2	1	无量纲位移 （壳， 8 个单元）

壳， 16 个单元

1 右键单击**壳， 8 个单元**并选择**复制粘贴**。

2 在**点计算**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “壳， 16 个单元”。

3 定位到**数据**栏。从**参数值 (meshdist)** 列表中选择 **16**。

4 定位到**表达式**栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
Fn2	1	无量纲力 （壳， 16 个单元）
wn2	1	无量纲位移 （壳， 16 个单元）

帽冠处载荷与位移的关系

1 在**模型开发器**窗口中，单击**帽冠处载荷与位移的关系**。

2 在**计算组**的**设置**窗口中，单击以展开**格式**栏。

3 从**包含参数**列表中选择**关**。

4 在**帽冠处载荷与位移的关系**工具栏中单击 = **计算**。