

强度计算.结构分析：屈曲分析：10.屈曲后行为分析

1 屈曲后行为分析基础

1.1 屈曲后行为分析的定义

屈曲后行为分析，也称为后屈曲分析或非线性屈曲分析，是一种结构工程分析方法，用于研究结构在屈曲后的行为。屈曲是结构在承受压缩载荷时，由于稳定性不足而发生的突然变形现象。传统的屈曲分析仅关注结构屈曲的临界点，而屈曲后行为分析则进一步探讨结构在超过屈曲临界点后的响应，包括变形模式、承载能力和能量耗散能力。

1.2 屈曲后行为分析的重要性

屈曲后行为分析对于设计和评估结构的安全性和可靠性至关重要。它帮助工程师理解结构在屈曲后的承载能力，这对于设计能够承受意外载荷或在屈曲后仍能安全工作的结构尤为重要。例如，在桥梁、塔架、压力容器等结构设计中，屈曲后行为分析是确保结构稳定性和安全性的关键步骤。

1.3 屈曲后行为分析的历史发展

屈曲后行为分析的发展可以追溯到 20 世纪初，但直到计算机技术的出现，才使得这种复杂的非线性分析成为可能。早期的屈曲分析主要关注于线性屈曲，即结构在屈曲前的稳定性分析。然而，随着结构设计的复杂性和对安全性的更高要求，人们开始意识到屈曲后行为的重要性。20 世纪 60 年代至 70 年代，随着有限元方法的成熟和计算机计算能力的提升，屈曲后行为分析逐渐成为结构工程分析的一个重要分支。

1.3.1 示例：使用 Python 进行屈曲后行为分析

在本示例中，我们将使用 Python 的 SciPy 库来模拟一个简单的柱子在屈曲后的行为。假设我们有一个长度为 1 米、截面为圆形、直径为 0.1 米的钢柱，承受轴向压缩载荷。我们将使用 SciPy 的 `optimize.root` 函数来求解柱子在屈曲后的平衡路径。

```
import numpy as np
from scipy.optimize import root
from scipy.interpolate import interp1d

# 定义柱子的物理参数
length = 1.0 # 柱子长度，单位：米
```

```

diameter = 0.1 # 柱子直径, 单位: 米
E = 200e9 # 弹性模量, 单位: 帕斯卡
nu = 0.3 # 泊松比
rho = 7850 # 钢的密度, 单位: 千克/立方米

# 计算柱子的截面属性
area = np.pi * (diameter / 2) ** 2 # 截面积
I = np.pi * (diameter / 2) ** 4 / 4 # 惯性矩

# 定义屈曲后行为分析的非线性方程
def post_buckling_equation(u, P):
    x = u[0]
    y = u[1]
    # 使用欧拉-伯努利梁理论的非线性方程
    eq1 = y - (P / (E * I)) * (length / 2) ** 2 * np.sin(np.sqrt(P / (E * I)) * length / 2)
    eq2 = y - (P / (E * I)) * (length / 2) ** 2 * np.sin(np.sqrt(P / (E * I)) * x)
    return [eq1, eq2]

# 定义载荷范围
P_range = np.linspace(0, 1e6, 100)

# 初始化解向量
u0 = [0, 0]

# 存储解
solutions = []

# 对每个载荷进行求解
for P in P_range:
    sol = root(post_buckling_equation, u0, args=(P,))
    u0 = sol.x
    solutions.append(sol.x)

# 将解转换为插值函数, 用于绘制屈曲后行为曲线
x = np.array([s[0] for s in solutions])
y = np.array([s[1] for s in solutions])
f = interp1d(x, y)

# 绘制屈曲后行为曲线
import matplotlib.pyplot as plt

plt.figure()
plt.plot(x, y, label='屈曲后行为')
plt.xlabel('位移 (米)')

```

```
plt.ylabel('载荷 (牛顿)')
plt.title('屈曲后行为分析示例')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

1.3.2 示例解释

在上述代码中，我们首先定义了柱子的物理参数，包括长度、直径、弹性模量、泊松比和密度。然后，我们定义了一个非线性方程，该方程基于欧拉-伯努利梁理论，用于描述柱子在屈曲后的平衡状态。我们使用 SciPy 的 `optimize.root` 函数来求解这个非线性方程，得到柱子在不同载荷下的位移。最后，我们使用 `matplotlib` 库来绘制屈曲后行为曲线，展示了柱子在屈曲后的位移与载荷之间的关系。

通过这种分析，工程师可以评估柱子在屈曲后的承载能力，以及结构在屈曲后的稳定性，这对于设计能够承受意外载荷或在屈曲后仍能安全工作的结构至关重要。

2 屈曲后行为分析方法

2.1 线性屈曲分析

线性屈曲分析是结构工程中一种评估结构在特定载荷下发生屈曲可能性的方法。它基于线性假设，即结构的变形和载荷之间存在线性关系，且材料处于弹性阶段。线性屈曲分析通常使用特征值分析来确定结构的临界屈曲载荷和相应的屈曲模态。

2.1.1 原理

线性屈曲分析的核心是求解结构的特征值问题。结构的平衡方程可以表示为：

$$[K]\{u\} = [K_c]\{u\}$$

其中， $[K]$ 是结构的刚度矩阵， $[K_c]$ 是屈曲刚度矩阵， $\{u\}$ 是位移向量。在屈曲分析中，我们寻找使得上述方程成立的最小载荷因子 λ ，即：

$$[K]\{u\} = \lambda[K_c]\{u\}$$

2.1.2 内容

线性屈曲分析通常在有限元软件中进行，如 ANSYS、ABAQUS 等。分析步骤包括：

1. **建立模型**：定义结构的几何形状、材料属性和边界条件。
2. **施加载荷**：应用结构上的预加载荷。
3. **求解特征值问题**：计算临界屈曲载荷和屈曲模态。
4. **结果分析**：评估结构的稳定性，确定屈曲模态和临界载荷。

2.2 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析考虑了结构的几何非线性、材料非线性和载荷非线性，能够更准确地预测结构在屈曲后的行为。与线性屈曲分析相比，非线性屈曲分析能够捕捉到结构屈曲后的复杂变形模式和载荷-位移曲线。

2.2.1 原理

非线性屈曲分析通过迭代求解非线性平衡方程来实现。平衡方程可以表示为：

$$[K]\{u\} + [K_g]\{u\} + [K_m]\{u\} = \{F\}$$

其中， $[K]$ 是线性刚度矩阵， $[K_g]$ 是几何刚度矩阵， $[K_m]$ 是材料刚度矩阵， $\{F\}$ 是外加载荷向量。非线性屈曲分析通过逐步增加载荷并求解位移向量来追踪结构的屈曲后行为。

2.2.2 内容

非线性屈曲分析的步骤包括：

1. **模型建立**：与线性屈曲分析相同，但需要更详细的材料和几何非线性描述。
2. **载荷步设置**：定义载荷的增量和迭代求解的控制参数。
3. **求解**：使用增量迭代法或直接积分法等非线性求解器进行求解。
4. **结果分析**：分析屈曲后的载荷-位移曲线，确定结构的后屈曲承载能力和稳定性。

2.3 直接积分法

直接积分法是一种用于求解非线性动力学问题的数值方法，它也可以应用于非线性屈曲分析中，特别是在考虑动力学效应时。

2.3.1 原理

直接积分法通过在时间域内逐步积分动力学方程来求解结构的响应。动力学方程可以表示为：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

其中， $[M]$ 是质量矩阵， $[C]$ 是阻尼矩阵， $\{\ddot{u}\}$ 和 $\{\dot{u}\}$ 分别是加速度和速度向量， $\{F(t)\}$ 是随时间变化的外加载荷向量。

2.3.2 内容

直接积分法的步骤包括：

1. **初始化**：设定初始条件，如初始位移和速度。
2. **时间步设置**：定义时间步长和求解的总时间。

3. **求解**：在每个时间步内，使用数值积分方法（如 Newmark-beta 法）求解动力学方程。

4. **结果分析**：分析结构在屈曲后的动力学响应，如位移、速度和加速度。

2.4 增量迭代法

增量迭代法是一种常用的非线性静态分析方法，它通过逐步增加载荷并迭代求解结构的平衡状态来追踪结构的屈曲后行为。

2.4.1 原理

增量迭代法在每个载荷步内，通过迭代求解非线性平衡方程来确定结构的位移。载荷步的大小和迭代求解的控制参数（如收敛准则和最大迭代次数）需要仔细选择，以确保分析的准确性和效率。

2.4.2 内容

增量迭代法的步骤包括：

1. **模型建立**：定义结构的几何、材料和边界条件。
2. **载荷步设置**：定义载荷的增量和迭代求解的控制参数。
3. **求解**：在每个载荷步内，通过迭代求解非线性平衡方程来确定结构的位移。
4. **结果分析**：分析屈曲后的载荷-位移曲线，确定结构的后屈曲承载能力和稳定性。

2.4.3 示例代码

以下是一个使用 Python 和 SciPy 库进行增量迭代法求解非线性屈曲问题的示例代码：

```
import numpy as np
from scipy.sparse.linalg import spsolve
from scipy.sparse import csc_matrix

# 定义结构的刚度矩阵 K 和外加载荷向量 F
K = csc_matrix([[4, -1], [-1, 4]]) # 刚度矩阵
F = np.array([100, 0]) # 外加载荷向量

# 定义初始位移向量 u 和载荷增量 deltaF
u = np.zeros(2) # 初始位移向量
deltaF = 10 # 载荷增量

# 迭代求解
for i in range(10): # 进行 10 次迭代
```

```
F += deltaF # 增加载荷
u = spsolve(K, F) # 求解位移向量
print(f"迭代{i+1}: 载荷={F}, 位移={u}")
```

2.4.4 解释

在这个示例中，我们使用了一个简单的 2×2 刚度矩阵来模拟一个结构。通过逐步增加外加载荷并求解非线性平衡方程，我们追踪了结构的位移变化。SciPy 库的 `spsolve` 函数用于求解稀疏线性方程组，这在处理大型结构模型时非常有用。

通过上述方法和示例，我们可以深入理解屈曲后行为分析的原理和实施步骤，从而更准确地评估和预测结构在屈曲后的性能和稳定性。

3 屈曲后行为分析的步骤

3.1 模型建立与网格划分

在进行屈曲后行为分析之前，首先需要建立结构模型并进行网格划分。这一过程涉及到选择合适的建模软件，如 ANSYS、ABAQUS 或 NASTRAN，以及确定模型的几何形状和尺寸。网格划分是将连续的结构体离散化为有限数量的单元，以便进行数值计算。网格的质量直接影响到分析的准确性和计算效率。

3.1.1 示例：使用 ABAQUS 进行网格划分

```
# 导入 ABAQUS 模块
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
from caeModules import *
from driverUtils import executeOnCaeStartup

# 执行 ABAQUS 启动脚本
executeOnCaeStartup()

# 创建模型
mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__', sheetSize=200.0)
mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(100.0, 200.0))
mdb.models['Model-1'].Part(name='Part-1', dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].BaseShell(sketch=mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'])

# 网格划分
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].seedPart(size=10.0, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
```

1)

```
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].generateMesh()
```

3.2 材料与截面属性定义

定义材料属性和截面属性是屈曲后行为分析中的关键步骤。材料属性包括弹性模量、泊松比、屈服强度等，而截面属性则涉及到结构的横截面形状和尺寸。这些属性的准确定义对于预测结构在屈曲后的响应至关重要。

3.2.1 示例：定义材料属性

定义材料属性

```
mdb.models['Model-1'].Material(name='Steel')
mdb.models['Model-1'].materials['Steel'].Elastic(table=((200e3, 0.3), ))
mdb.models['Model-1'].materials['Steel'].Plastic(table=((250.0, 0.0), (300.0, 0.005)))
```

3.3 边界条件与载荷施加

边界条件和载荷的施加是模拟结构实际工作环境的重要环节。边界条件可以是固定约束、滑动约束等，而载荷则包括力、压力、温度载荷等。在屈曲后行为分析中，通常需要施加超过屈曲临界载荷的载荷，以观察结构的非线性响应。

3.3.1 示例：施加边界条件和载荷

施加边界条件

```
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].Set(name='Set-1', edges=mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].edges.findAt(((0.0, 0.0, 0.0),), ))
mdb.models['Model-1'].DisplacementBC(name='BC-1', createStepName='Initial', region=mdb.models['Model-1'].sets['Set-1'], u1=0.0, u2=0.0, u3=0.0, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0, amplitude=UNSET, fixed=OFF, distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None)
```

施加载荷

```
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].Set(name='Set-2', faces=mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].faces.findAt(((50.0, 100.0, 0.0),), ))
mdb.models['Model-1'].SurfacePressure(name='Load-1', createStepName='Step-1', region=mdb.models['Model-1'].sets['Set-2'], magnitude=1000.0, distributionType=UNIFORM, field='', localCsys=None)
```

3.4 分析设置与求解控制

分析设置包括选择合适的分析类型（如非线性静态分析或动力分析），定义分析步，以及设置求解器的控制参数。求解控制参数如时间步长、收敛准则等，

对于确保分析的稳定性和准确性至关重要。

3.4.1 示例：设置分析步和求解控制

设置分析步

```
mdb.models['Model-1'].StaticStep(name='Step-1', previous='Initial', initialInc=0.1, maxNumInc=1000, stabilizationMethod=DAMPING_FACTOR, stabilizationMagnitude=0.05, continueDampingFactors=False, adaptiveDampingRatio=0.05, maxNumIterations=30, minInc=1e-05)
```

设置求解控制

```
mdb.models['Model-1'].steps['Step-1'].setValues(maxNumIterations=50, minInc=1e-06)  
mdb.models['Model-1'].steps['Step-1'].setValues(stabilizationMethod=DISSIPATED_ENERGY_FRACTION, stabilizationMagnitude=0.02)
```

通过以上步骤，可以完成屈曲后行为分析的模型建立、材料与截面属性定义、边界条件与载荷施加，以及分析设置与求解控制。这些步骤是确保分析结果准确性和可靠性的重要基础。

4 屈曲后行为分析案例研究

4.1 桥梁结构的屈曲后行为分析

4.1.1 原理与内容

桥梁结构的屈曲后行为分析主要关注桥梁在屈曲发生后的非线性响应。屈曲是结构在承受超出其稳定承载能力的荷载时，突然改变其形状，从而导致结构失效的现象。在屈曲后，结构可能会进入一个复杂的非线性状态，此时的分析需要考虑材料的非线性、几何非线性以及边界条件的非线性。

4.1.1.1 材料非线性

桥梁的材料，如钢材或混凝土，其应力-应变关系在屈曲后可能不再遵循线性关系。例如，钢材在屈服点后会表现出塑性行为，而混凝土在达到极限强度后可能会出现裂缝。

4.1.1.2 几何非线性

屈曲后，桥梁的几何形状会发生显著变化，这将影响结构的刚度和承载能力。分析时需要考虑这种几何非线性，以准确预测结构的后续行为。

4.1.1.3 边界条件非线性

桥梁的支座条件、连接件的非线性行为等，也会影响屈曲后的结构分析。

例如，支座在大变形下可能不再提供刚性约束，而是表现出弹性或塑性行为。

4.1.2 案例分析

假设我们有一座简支梁桥，其主要承重结构为钢箱梁。在进行屈曲后行为分析时，我们首先需要建立一个详细的有限元模型，包括梁的几何尺寸、材料属性、荷载条件以及支座约束。

4.1.2.1 有限元模型

- 几何尺寸：梁长 100 米，高 2 米，宽 3 米。
- 材料属性：钢材，弹性模量 200 GPa，屈服强度 250 MPa。
- 荷载条件：桥面均布荷载 10 kN/m。
- 支座约束：两端简支。

4.1.2.2 分析步骤

1. 线性屈曲分析：确定结构的屈曲模态和临界荷载。
2. 非线性屈曲后分析：在屈曲模态的基础上，施加荷载并考虑材料、几何和边界条件的非线性，预测结构的屈曲后行为。

4.1.2.3 数据样例

假设线性屈曲分析得到的临界荷载为 1500 kN，屈曲模态为梁的中部向上弯曲。在非线形屈曲后分析中，我们施加 1600 kN 的荷载，观察结构的响应。

4.1.3 结果解释

分析结果可能显示，梁在中部向上弯曲后，两侧的支撑开始承受更大的力，而梁的中部则出现塑性变形。这种信息对于评估桥梁的安全性和修复方案至关重要。

4.2 高层建筑框架的屈曲后行为分析

4.2.1 原理与内容

高层建筑框架的屈曲后行为分析，重点在于评估框架结构在屈曲后的稳定性、承载能力和安全性。框架结构的屈曲通常发生在柱或梁的局部或整体失稳，这可能由风荷载、地震荷载或过大的自重引起。

4.2.1.1 材料非线性

建筑框架的材料，如钢材或混凝土，其非线性行为在屈曲后分析中至关重

要。钢材的塑性变形和混凝土的裂缝发展，都会影响结构的整体性能。

4.2.1.2 几何非线性

框架结构在屈曲后的几何变形，如柱的侧向弯曲或梁的扭曲，需要在分析中考虑，以评估结构的残余承载力。

4.2.1.3 边界条件非线性

建筑框架的支座条件、连接件的非线性行为，以及与周围结构的相互作用，都可能在屈曲后发生变化，影响结构的稳定性。

4.2.2 案例分析

考虑一座由钢筋混凝土框架构成的高层建筑，高度为 100 米，每层高度为 4 米。在进行屈曲后行为分析时，我们首先需要建立一个详细的有限元模型，包括框架的几何尺寸、材料属性、荷载条件以及支座约束。

4.2.2.1 有限元模型

- 几何尺寸：框架柱截面为 0.5 米×0.5 米，梁截面为 0.3 米×0.5 米。
- 材料属性：混凝土，弹性模量 30 GPa，抗压强度 30 MPa；钢筋，弹性模量 200 GPa，屈服强度 400 MPa。
- 荷载条件：考虑地震荷载，按规范计算。
- 支座约束：底部固定，顶部自由。

4.2.2.2 分析步骤

1. 线性屈曲分析：确定框架的屈曲模态和临界荷载。
2. 非线性屈曲后分析：在屈曲模态的基础上，施加地震荷载并考虑材料、几何和边界条件的非线性，预测框架的屈曲后行为。

4.2.2.3 数据样例

假设线性屈曲分析得到的临界荷载为 10000 kN，屈曲模态为框架的中部向外侧弯曲。在非线形屈曲后分析中，我们施加 11000 kN 的地震荷载，观察结构的响应。

4.2.3 结果解释

分析结果可能显示，框架在中部向外侧弯曲后，柱的侧向变形显著增加，而梁的裂缝也更加明显。这种信息对于评估建筑的安全性和制定加固措施非常

重要。

4.3 压力容器的屈曲后行为分析

4.3.1 原理与内容

压力容器的屈曲后行为分析，主要关注容器在承受内部压力或外部压力时的非线性响应。压力容器的屈曲通常由设计压力、温度变化或材料缺陷引起，分析时需要考虑材料的非线性、几何非线性以及容器的几何形状。

4.3.1.1 材料非线性

压力容器的材料，如钢材或合金，其应力-应变关系在屈曲后可能表现出塑性行为，这会影响容器的承载能力和安全性。

4.3.1.2 几何非线性

容器在屈曲后的几何变形，如壁厚的减薄或形状的改变，需要在分析中考虑，以评估容器的残余强度和稳定性。

4.3.1.3 几何形状

容器的几何形状，如球形、圆柱形或椭圆形，对屈曲后行为有显著影响。不同形状的容器，其屈曲模态和承载能力也不同。

4.3.2 案例分析

假设我们有一个圆柱形的压力容器，直径为 2 米，高为 5 米，用于储存高压气体。在进行屈曲后行为分析时，我们首先需要建立一个详细的有限元模型，包括容器的几何尺寸、材料属性、内部压力以及边界条件。

4.3.2.1 有限元模型

- 几何尺寸：直径 2 米，高 5 米，壁厚 0.02 米。
- 材料属性：钢材，弹性模量 200 GPa，屈服强度 250 MPa。
- 内部压力：设计压力为 10 MPa。
- 边界条件：两端封闭。

4.3.2.2 分析步骤

1. 线性屈曲分析：确定容器的屈曲模态和临界压力。
2. 非线性屈曲后分析：在屈曲模态的基础上，施加设计压力并考虑

材料、几何的非线性，预测容器的屈曲后行为。

4.3.2.3 数据样例

假设线性屈曲分析得到的临界压力为 8 MPa，屈曲模态为容器壁的波纹变形。在非线形屈曲后分析中，我们施加 10 MPa 的内部压力，观察容器的响应。

4.3.3 结果解释

分析结果可能显示，容器壁在承受 10 MPa 的内部压力后，出现了波纹变形，壁厚在某些区域减薄。这种信息对于评估容器的安全性和确定是否需要进行修复或更换至关重要。

以上案例研究展示了在不同结构中进行屈曲后行为分析的基本原理和步骤。通过详细的有限元建模和非线性分析，可以有效地评估结构在屈曲后的安全性和稳定性，为结构设计、维护和修复提供科学依据。

5 屈曲后行为分析的软件工具

5.1 ANSYS 在屈曲后行为分析中的应用

5.1.1 原理与内容

屈曲后行为分析是结构工程中的一项重要技术，用于评估结构在屈曲后继续承载的能力。ANSYS 作为一款强大的有限元分析软件，提供了多种工具和方法来执行这类分析。在屈曲后行为分析中，ANSYS 可以模拟结构的非线性行为，包括几何非线性、材料非线性和接触非线性，以预测结构在屈曲后的响应。

5.1.1.1 非线性分析设置

在 ANSYS 中进行屈曲后行为分析，首先需要设置非线性分析类型。这通常在 Solution 菜单下的 Analysis Type 中完成，选择 Nonlinear Static 或 Large Deflection 选项。

5.1.1.2 材料属性定义

对于屈曲后分析，材料的非线性属性至关重要。在 ANSYS 中，可以通过 Material Props 菜单下的 Nonlinear 选项来定义材料的塑性、蠕变或超弹性行为。

5.1.1.3 几何非线性考虑

屈曲后分析需要考虑结构的几何非线性，即大变形效应。在 ANSYS 中，可

以通过在 **Solution** 菜单下的 **Analysis Type** 中选择 **Large Deflection** 来激活这一选项。

5.1.1.4 接触非线性处理

在结构分析中，接触非线性是另一个关键因素，尤其是在屈曲后分析中。**ANSYS** 提供了 **Contact** 工具，允许用户定义接触对、接触行为和摩擦系数，以准确模拟结构部件之间的相互作用。

5.1.1.5 后处理与结果分析

完成分析后，**ANSYS** 的 **Postproc** 菜单提供了丰富的后处理工具，用于查看和分析结果。用户可以查看位移、应力、应变和屈曲模态，以及结构在屈曲后的变形状态。

5.1.2 示例

假设我们有一个简单的梁结构，需要分析其在屈曲后的承载能力。以下是一个使用 **ANSYS** 进行屈曲后行为分析的简化示例：

```
/prep7
et,1,beam188
r,1,1,1,1
a,0,0,0,10,0,0,10,10,0
a,10,0,0,20,0,0,20,10,0
d,1,all,1e-6
d,2,all,1e-6
nset,all
esize,1
type,1
real,1
sbeam,1,1,1,1
mpdata,young,1,2e11
mpdata,poisson,1,0.3
finish
/solu
antype,static
outres,all
solve
antype,nlstat
nlgeom,on
solve
/post1
prnsol,disp
```

这段代码首先定义了一个梁结构，然后设置了材料属性和网格划分。接着，

它执行了线性静态分析，随后进行非线性静态分析，考虑了大变形效应。最后，它输出了位移结果。

5.2 ABAQUS 进行屈曲后行为分析的步骤

5.2.1 原理与内容

ABAQUS 是另一款广泛使用的有限元分析软件，特别擅长处理复杂的非线性问题，包括屈曲后行为分析。ABAQUS 通过其强大的非线性求解器和丰富的材料模型库，能够精确模拟结构在屈曲后的非线性响应。

5.2.1.1 分析步设置

在 ABAQUS 中，屈曲后行为分析通常通过定义多个分析步来实现。第一个分析步通常是线性屈曲分析，用于确定屈曲模态和临界载荷。随后的分析步则用于模拟结构在屈曲后的非线性响应。

5.2.1.2 材料模型定义

ABAQUS 提供了多种材料模型，包括塑性、蠕变和超弹性模型，用于描述材料在屈曲后的非线性行为。这些模型可以在 *Material 和 *Elastic 或 *Plastic 等子命令中定义。

5.2.1.3 几何非线性激活

为了准确模拟屈曲后的大变形，需要在 ABAQUS 中激活几何非线性。这可以通过在分析步中使用 *Step 命令，并设置 NLGEOM=YES 来实现。

5.2.1.4 接触行为定义

ABAQUS 的接触模块允许用户定义接触对、接触类型和摩擦系数，这对于模拟结构在屈曲后的接触非线性至关重要。接触行为可以在 *Contact Pair 和 *Surface Interaction 等命令中定义。

5.2.1.5 后处理与结果分析

ABAQUS 的 *Output 命令可以用于定义输出变量，包括位移、应力和应变等。通过 *History Output 和 *Field Output，用户可以在后处理阶段查看和分析结构在屈曲后的响应。

5.2.2 示例

以下是一个使用 ABAQUS 进行屈曲后行为分析的简化示例：

```
** Job name: PostBucklingAnalysis Model name: Model-1
**
*Heading
** This is a simple example of post-buckling analysis in ABAQUS
**
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
*Part, name=Beam
*Geometry, coordinate system=Cartesian
*Line, point1=(0,0), point2=(10,0)
*Line, point1=(10,0), point2=(10,10)
*Line, point1=(10,10), point2=(0,10)
*Line, point1=(0,10), point2=(0,0)
*End Part
**
*Assembly, name=Assembly1
*Instance, name=Beam-1, part=Beam
*End Assembly
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Static
**
*Boundary
Beam-1.1, 1, 1
Beam-1.2, 2, 2
**
*Material, name=Steel
*Elastic
2e11, 0.3
**
*Section, type=Solid, elset=Beam-1, material=Steel
**
*Element, type=B31
Beam-1.1, Beam-1.2, Beam-1.3, Beam-1.4
**
*Output, field, variable=ALL
**
**
**
**
**
```

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/166224102101010231>