

Abaqus工程师系列丛书

- ◆ Abaqus中国区技术团队倾力打造
- ◆ 12个大型工程实例
- ◆ 汇集接触分析、动态分析、多体分析、热分析、成形分析、动载分析、岩土开挖分析

Abaqus

经典例题集

DS系统SIMULIA大中华区Abaqus中国区技术团队 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

Abaqus工程师系列丛书

Abaqus经典例题集

DS系统SIMULIA大中华区Abaqus中国区技术团队 编著



机械工业出版社

本书由DS系统SIMULIA大中华区Abaqus中国区技术团队的资深工程师编写，书中汇集了Abaqus软件在求解工程问题中涉及的接触分析、动态分析、多体分析、热分析、成形分析、动载分析和岩土开挖分析7个方向的典型问题。作者将各类问题归结为专题分章讲解，并在每章中，针对同类问题，给出基于不同工程背景的应用实例，累计共12个大型工程实例。

本书例题经典，工程背景深厚，对使用Abaqus软件解决实际工程问题的技术人员具有极好的指导意义和参考价值。本书也适合高等院校、科研机构相关人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

Abaqus 经典例题集 /DS 系统 SIMULIA 大中华区 Abaqus 中国区技术团队编著. —北京：机械工业出版社，2016.1

（Abaqus 工程师系列丛书）

ISBN 978-7-111-52304-8

I. ①A… II. ①D… III. ①有限元分析-应用软件 IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 285844 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：孔 劲 责任编辑：孔 劲

责任校对：佟瑞鑫 封面设计：张 静

责任印制：乔 宇

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14 印张·342 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-52304-8

定价：76.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066 机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294 机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

前 言

DS (达索) 系统 SIMULIA 公司旗下的 Abaqus 软件是世界上先进的大型通用有限元分析软件, 它具有丰富的材料本构模型、强大的核心求解器和操作简明的用户界面, 应用范围从相对简单的线性分析问题到许多复杂的非线性问题, 被大量国内外重要科研院所、知名企业所采用。尤其是 Abaqus 软件强大的隐式求解器和显式求解器的分析功能, 适用于解决各种静力学、动力学、机构运动、流固耦合、热固耦合、声学分析、岩土力学分析、电磁分析及压电分析等线性和非线性物理问题, 广泛应用于航空航天、汽车交通、国防军工、机械制造、石油化工、土木工程、生物医学、电子工程、水利水电、能源、地矿、造船以及家用电器等领域。

随着我国经济的快速发展, 各个行业的用户针对复杂工程问题研究的广度和深度也随之加强, 同时在客观上要求减少试验和开模次数, 缩短研发周期, 这些问题的解决主要依赖于研发过程中计算仿真分析技术的引入和提高。使用仿真分析工具在对所遇到的工程技术问题进行深层次研究的同时, 还可以大大提高研发效率, 降低生产成本。Abaqus 有限元软件就是强有力的分析工具。目前, Abaqus 软件越发为各个行业所重视, 应用范围也越来越广, 许多大的厂商已将使用 Abaqus 软件进行仿真分析作为产品设计和生产中的一个重要环节。同时, 把 Abaqus 分析结果作为衡量和改进设计的一个评估指标。

随着国内学习和使用 Abaqus 软件用户的增多, 众多用户一直反映 Abaqus 软件相关的中文资料比较欠缺, 很多 CAE 分析工程师由于无法得到好的 Abaqus 入门材料, 始终感到 Abaqus 入门较难。鉴于此原因, 我们根据行业应用选取了一些具有代表性的实例, 将其在仿真分析中的操作记录下来, 并编纂成书出版, 以方便用户能够尽快掌握和使用 Abaqus/CAE 来进行有限元分析。

本书介绍了 Abaqus 软件在各个行业中的基本应用案例, 共分 7 章, 分别介绍了 Abaqus 在接触非线性、动态响应分析、多体动力学分析、热场分析、加工成形分析、海洋波动载荷及岩土开挖和土体强度分析方面的实例。全书精选了 20 个具有典型代表意义的应用例题, 并配合 Abaqus 软件界面进行操作说明, 详细介绍了在 Abaqus 中建模的步骤, 可帮助读者更好地理解整个建模过程, 相信会给广大的 Abaqus 学习者和爱好者提供很好的借鉴。

本书由 DS 系统 SIMULIA 大中华区的技术工程师们编写。由于时间关系难免有错误和不妥之处, 敬请各位专家和广大读者批评指正!

编者

目 录

前言

第 1 章 Abaqus 接触分析实例..... 1

1.1 汽车钢板弹簧分析..... 1

1.1.1 背景..... 1

1.1.2 问题描述..... 1

1.1.3 分析流程..... 2

1.1.4 计算结果..... 9

1.2 进气管冷却盖垫片的模拟分析..... 10

1.2.1 引言..... 10

1.2.2 问题描述..... 11

1.2.3 模型的建立..... 11

1.2.4 结果分析..... 17

1.3 对某接头结构复杂接触问题的数值

模拟——整体模型分析..... 18

1.3.1 引言..... 18

1.3.2 模型的分析流程..... 19

1.3.3 后处理..... 27

1.4 对某接头结构复杂接触问题的数值

模拟——子模型分析..... 27

1.4.1 建立模型..... 27

1.4.2 定义子模型边界..... 28

1.4.3 划分网格..... 29

1.4.4 提交计算..... 29

1.4.5 后处理..... 30

1.5 对轮胎装配和充气过程的模拟..... 30

1.5.1 引言..... 30

1.5.2 分析流程..... 31

1.5.3 提交作业..... 47

1.5.4 后处理..... 47

1.6 无线鼠标下落测试的模拟..... 48

1.6.1 引言..... 48

1.6.2 问题描述..... 48

1.6.3 建立有限元模型..... 48

1.6.4 结果分析和后处理..... 53

第 2 章 Abaqus 动态分析实例..... 55

2.1 制动噪声分析..... 55

2.1.1 背景..... 55

2.1.2 问题描述..... 55

2.1.3 模型的建立..... 56

2.1.4 递交作业并进行后处理..... 61

2.1.5 结果及讨论..... 62

2.2 汽轮机叶片模态及稳态动力响应分析..... 62

2.2.1 背景..... 62

2.2.2 问题描述..... 63

2.2.3 建立模型..... 64

2.2.4 递交作业并进行后处理..... 74

2.3 水下圆筒在水下爆炸冲击下的响应..... 75

2.3.1 背景..... 75

2.3.2 问题描述..... 75

2.3.3 建立模型..... 75

2.3.4 递交作业并进行后处理..... 81

2.4 混凝土重力坝在 seismic 荷载下的

响应分析..... 82

2.4.1 背景..... 82

2.4.2 问题描述..... 82

2.4.3 材料属性..... 83

2.4.4 阻尼..... 84

2.4.5 载荷和解的控制..... 84

2.4.6 分析结果及结果讨论..... 85

2.4.7 参考文献..... 89

2.4.8 附录：输入文件..... 89

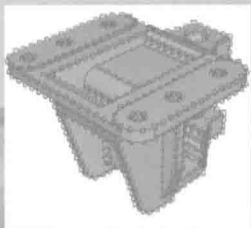
2.5 随机振动分析..... 106

2.5.1 清理模型..... 107

2.5.2 后处理..... 116

2.5.3 附录: postprocess.py 文件	118	5.1.4 定义分析步	163
第 3 章 Abaqus 多体分析实例	120	5.1.5 定义接触	163
3.1 飞机起落架机构分析	120	5.1.6 定义约束	165
3.1.1 建立模型	120	5.1.7 划分网格	166
3.1.2 添加属性	121	5.1.8 提交任务并察看结果	167
3.1.3 结构装配	122	5.2 钣金成形例题讲解	169
3.1.4 定义分析步	123	5.2.1 背景	169
3.1.5 建立接触和耦合关系	123	5.2.2 问题描述	169
3.1.6 施加载荷、边界条件	127	5.2.3 建立模型	170
3.1.7 划分网格	128	第 6 章 Abaqus 海洋波动载荷	
3.1.8 提交作业	129	的分析实例	183
3.2 曲柄机构的仿真分析	129	6.1 背景	183
3.2.1 引言	129	6.2 问题的描述	183
3.2.2 问题描述	130	6.3 建立模型	184
3.2.3 模型的建立	130	第 7 章 Abaqus 岩土开挖	
3.2.4 结果分析	135	和土体强度分析实例	190
第 4 章 Abaqus 热分析实例	137	7.1 对隧道开挖过程的模拟	190
4.1 制动盘热—应力分析	137	7.1.1 建立模型	190
4.1.1 背景	137	7.1.2 添加材料属性	194
4.1.2 问题描述	137	7.1.3 结构装配	195
4.1.3 CAE 实现	137	7.1.4 定义分析步	196
4.2 BGA 封装组件热循环模拟	145	7.1.5 定义相互作用属性	197
4.2.1 背景	145	7.1.6 定义边界条件和载荷	197
4.2.2 问题描述	146	7.1.7 划分网格	202
4.2.3 建立模型	147	7.1.8 编辑关键字	204
4.2.4 运算和结果	153	7.1.9 提交作业	205
第 5 章 Abaqus 成形分析实例	155	7.1.10 后处理	206
5.1 弯管成形实例	155	7.2 土体边坡稳定分析	206
5.1.1 几何建模	155	7.2.1 背景	206
5.1.2 定义材料	160	7.2.2 问题描述	207
5.1.3 组合装配	161	7.2.3 CAE 建模、分析和后处理	207

第 1 章



Abaqus 接触分析实例

1.1 汽车钢板弹簧分析

1.1.1 背景

汽车车架或车身若直接安装于车桥上，则会由于道路的不平而上下颠簸振动，从而使车上的乘员感到不舒服或者损坏货物，因此汽车上必须有悬架装置。汽车悬架是车架或车身与车桥之间一切传力连接装置的统称，其作用是弹性地连接车桥与车架或车身，缓和行驶中车辆受到的冲击，保证货物完好和人员舒适，衰减由于弹性系统引起的振动，传递垂直、纵向、侧向反力及其力矩，并起导向作用，使车轮按一定的轨迹相对车身跳动。

钢板弹簧作为汽车悬架系统用的很多的弹性元件，其用来承受并传递垂直载荷，缓和由于路面不平引起的对车身的冲击。此外其本身兼起导向作用，可不设导向机构。

钢板弹簧是由若干不等长的合金弹簧片叠加在一起组合成一根近似等强度的梁，如图 1-1 所示。其最长的一片称为主片，其两端弯成卷耳的行状，用弹簧销固定在车架的支架或吊耳上作铰接。



图 1-1 常见钢板弹簧的几何模型

1.1.2 问题描述

以一个简单的钢板弹簧为例，其中整个钢板弹簧只考虑有一个主簧和一个副簧的情况，另外包括的部件有：主、副簧之间的垫块，主簧支架以及副簧支架，各部件示意几何模型及相对位置如图 1-2 所示。



图 1-2 钢板弹簧的结构图

在该算例中，主簧中部承受一个垂直向下、大小为 20000N 的力。随着载荷的增大，主副簧会向下运动，当载荷达到一定程度时，副簧与副簧支架发生接触，此时，弹簧刚度会随之增大，而随着载荷的进一步增大，因为受到副簧的支撑，主副簧都会发生反弓。在钢板弹簧的工作过程中，主簧受力点的位移超过了 150mm。从整个过程来看，涉及了主副簧的大变形（大行程，同时会发生反弓）以及副簧与副簧支架之间的接触，因此简单的线性分析已经不能满足此分析的需要，如果要真实地模拟整个弹簧的工作状况，我们必须把主副簧大变形引起的几何非线性因素和副簧与副簧支架相互接触而产生的边界非线性因素考虑进去。同时我们可以知道，弹簧的理论力—位移曲线是一条具有拐点的折线如图 1-3 所示，在副簧与副簧支架接触前是一个刚度，而在两者接触后其刚度会增大，形成另外一条曲率比较大的直线。

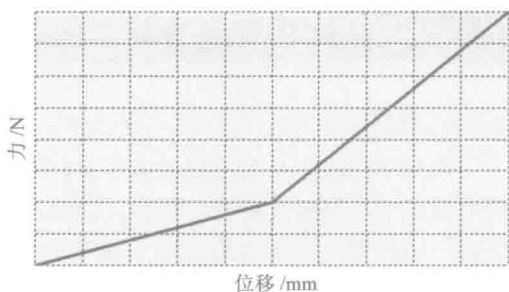


图 1-3 弹簧的理论力—位移曲线

整个分析中，不涉及材料的非线性，所有部件的材料性质均为弹性钢材料，弹性模量为 206800MPa，泊松比为 0.3。

所有部件均以实体单元划分，主副簧及垫块为 C3D8 单元，主副簧支架为 C3D4 单元。

所有主副簧与大梁连接的孔，均为全约束，限定任何方向的自由度。

主簧与主簧支架间实际为轴销连接，这种连接允许主簧在受力后连接处发生转动，可以将一部分力发散出去。在 Abaqus 模拟中，我们以 Abaqus 单元库中 CONNECTOR 单元中的 HINGE 单元来进行模拟二者之间的连接关系，描述这种运动副。

副簧与副簧之间设置接触，共两组，其中副簧支架为主面，而副簧为从面，表征二者之间接触性质的摩擦参数设为 0.2，主副簧和垫块之间设为 TIE 接触。

1.1.3 分析流程

运行 Abaqus/CAE，进入 Abaqus/CAE 运行环境。

1. 模型的导入

1) 在 File 菜单中选择 Import 选项，选择其中的 Part 选项，在 Import Part 对话框中选择相对应的 File Filter 文件格式将文件导入。

2) 在 Model 菜单中将模型命名为 Plate Spring Analysis。

3) 进入 Part 的 Module 菜单将新导入的模型命名为 Spring，同时选择 Part Manager 中的 Copy 选项，在 Part Copy 对话框中将新的 Part 命名为 spring_Parts，同时要选择 Separate



disconnected regions into parts 选项, 如图 1-4 所示。此时没有连接在一起的部件就被分开为单独的 Part, Abaqus 自动为其赋予了相应的名字。如 spring_Parts-1, spring_Parts-2 等。

4) 需要对其几何模型进行一定的分割。进入菜单 Tools, 在 Part 选项中选择主簧部件, 因为要在主簧的中部加载, 因此选择 Partition, 进入 Create Partition 对话框, 如图 1-5 所示。

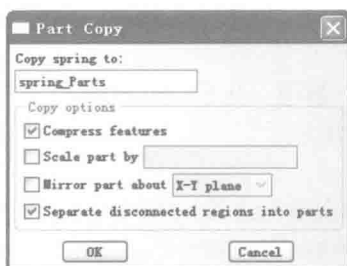


图 1-4 Part Copy 对话框



图 1-5 主簧部件及 Create Partition 对话框

5) 选择 Face 中的 Use shortest path between 2 points, 见图 1-5, 单击 Apply, 选择主簧的欲加载面, 单击 Done, 将此面的两个中点分别选为 Start point 和 End point, 则上表面被均匀分割为两个表面。

6) 选择 Create Partition 对话框中 Edge 选项, 选择 Select midpoint/datum point, 单击 Apply, 选择上一步分割此面的线作为欲分割的 Edge, 选择此线上的中点作为分割点, 单击 Create Partition, 则在随后的网格划分中, 会在此点形成一个节点, 用来加载。

2. 创建材料

1) 单击左边工具栏的 Create Material 按钮, 进入 Edit Material 项, 输入 linear_steel 作为名称, 如图 1-6 所示。

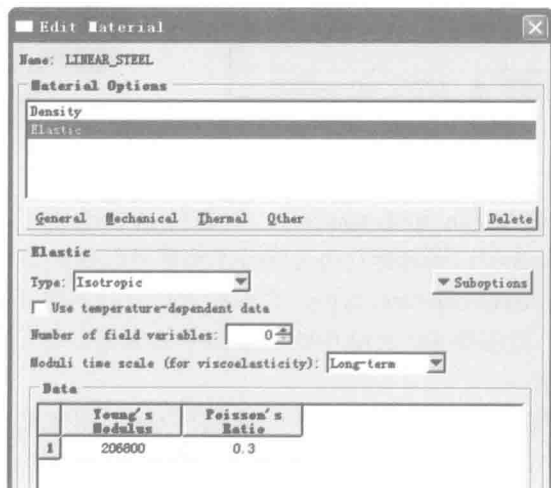


图 1-6 Edit Material 对话框

2) 单击 **General** → **Density**, 输入 7.86×10^{-9} 作为密度。

3) 单击 **Mechanical** → **Elastic**, 输入 206800 作为弹性模量, 0.3 作为泊松比。

4) 单击左边工具栏的 Create Section 按钮, 在 Create Section 对话框中, 命名为 solid, 选中 Solid 和 Homogeneous, 单击 Continue, 在 Edit Section 菜单中选中 linear_steel 作为材料。

5) 单击左边工具栏中的 Assign Section 按钮, 选择部件 Spring_Parts_1, 单击 Done, 在 Assign Section 对话框中选中 Solid, 单击 OK。

6) 同 5) 的操作, 为其余部件指派同样的 SECTION。

7) 如果不同的部件采用不同的材料, 以及要考虑分析中的材料非线性, 则我们也可以对不同的部件赋予相应的材料, 并且在材料模块中添加相应的非线性数据。

3. 模型的组装以及界面的定义

进入 Assembly 模块, 单击工具栏中的 Instance Part 按钮, 在 Create Instance 对话框中选中 Spring_Parts_1 到 7, 单击 Apply, 将各个部件依次实例化。

4. 划分网格

因为在随后的步骤中, 要用 Connector 单元来模拟主簧与主簧支架间的轴销连接, 因此需要找到主簧及主簧支架上的连接孔的圆心, 将孔与相对应的圆心相互 Coupling 在一起, 然后设置相应的 Connector 单元。

1) 进入 Mesh 模块, 对模型进行网格划分。对于主簧, 副簧以及相互之间的垫块用 Hex 单元来划分, 对于主副簧支架用 Tetra 单元来划分。

2) 在 Part 选项中选择 Spring-Parts-1 即其中的一个主簧支架, 在工具箱中选择 Seed Parts, 为所选部件的网格划分选择合适的单元尺寸。在 Global Seeds 对话框的 Approximate global size 中输入 10, 作为单元尺寸, 如图 1-7 所示, 接受其他默认选择, 单击 Apply, 退出相应的对话框。

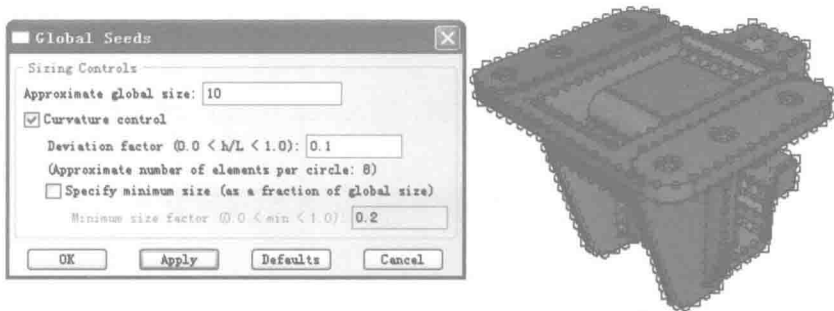


图 1-7 Global Seeds 对话框和模型显示

3) 选择工具箱中的 Assign mesh controls, 为部件选择合适的 Element shape, 在 Mesh controls 对话框中选择 Tet 选项, 即选择自由分网技术将部件以四面体网格进行划分。

4) 选择工具箱中的 Assign element type, 为部件选择合适的单元类型, 在 Element type 对话框中接受默认的选项, 即选择 Standard 中的一阶四面体单元, 单元类型为 C3D4 单元, 单击 OK, 完成单元类型的设置。

5) 单击 Mesh part 快捷按钮, 在 Prompt area 中选择 OK, 则完成了对此部件的网格划分。

6) 选择 Mesh 菜单中的 Creat Mesh Part...选项, 如图 1-8 所示。在 Prompt area 中的 Mesh part name 中输入部件的名称, 按回车键。则生成了相应的 Mesh Part。



7) 进入 Assembly 模块, 同以上的操作一样的技术, 将此 Mesh Part 实例化。

8) 与此类似, 将其余的主副簧生成相应的网格后实例化, 生成时选择同样的单元尺寸和单元类型。

9) 对于主副簧及中间的垫块部件采用 Hex 单元来划分, 整个程序同支架的划分没有区别。对于副簧的网格划分, 沿副簧厚度方向划分两层。可以在 Seed 菜单中选择 Edge By Number, 选择副簧沿厚度的各个边, 将其单元数设置为 2。对于单元类型的选择, 在 Element Type 中选择 C3D8H 的单元类型。

此时我们已经完成了部件的网格划分, 并将各个划分网格后的部件实例化, 在此基础上, 我们将进行部件之间的连接以及接触关系的设置。

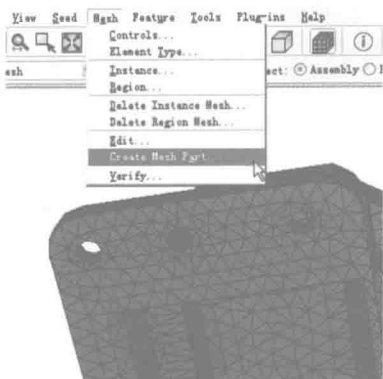


图 1-8 Mesh Part 界面

5. 分析步的设定以及输出需求的设定

1) 进入 Step 模块, 单击工具栏的 Create Step 按钮, 进入 Create Step 对话框。

2) 建立一个 Static, General 的分析步, 命名其为 Spring_load, 单击 Continue。

3) 在 Edit Step 对话框中打开 Nlgeom, 选择 on, 同时将 Incrementation 中的 Initial Increment size 设置为 0.01, 如图 1-9 所示, 接受其他的默认选择, 单击 OK, 完成分析步的设定。

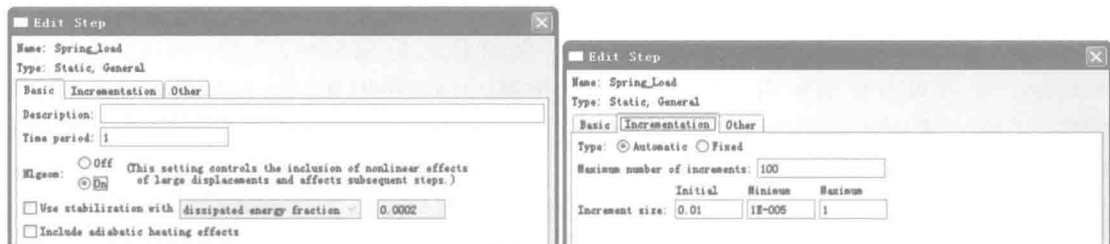


图 1-9 Step 的编辑对话框

4) 在主菜单中选择 **Tools** → **Set** → **Manager**, 进入 Set Manager, 单击左下角的 Create, 命名为 Monitor Node, 在 Creat Set 对话框中选择 Node, 选择在步骤一中分割部件后形成的中点 (划分网格时在此形成一个节点), 单击 Done, 完成 Set 的设置。

5) 单击工具栏中的 History Output Manager 按钮, 进入对话框后, 删除原有的 H-Output-1, 单击左下角的 Create 创建一个新的输出需求, 命名为 Output, 在 Domain 下拉菜单中选择 Set name, 选择刚才建立的 Load point 作为 Set name, 选择 U3 作为输出变量, 单击 OK。

6) 单击工具栏中的 Field Output Manager 按钮, 进入对话框后, 删除原有的 H-Output-1, 单击左下角的 Create 创建一个新的输出需求, 命名为 Output, 接受默认的输出, 单击 OK。

7) 单击 Output 菜单中的 DOF Monitor... 选项, 单击 Edit, 在提示栏中选择 Mesh, 同时选择右下角的 Points..., 弹出 Region Selection 对话框, 选择已经建立的 Sets, 单击 Continue, 在 Degree of freedom 中输入 3。每一个 Increments 输出一次, 如图 1-10 所示, 对此节点在加载后的 Z 方向的位移进行监控, 其位移数值将写入

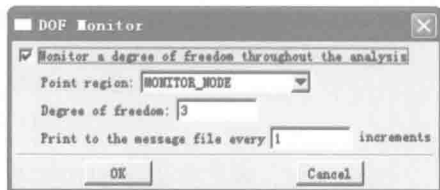


图 1-10 DOF Monitor 边界对话框



随后计算中的 *.sta 文件，便于我们及时发现问题。

现在已经完成了分析步和参数输出的设置，对于用户感兴趣的一些输出我们也可以通过 OUTPUT 选项来添加完成，在此就不赘述了。

6. 定义部件之间的相互关系以及接触

首先定义各个面 (Surface)，便于定义接触以及连接方式等。

1) 首先可以从主菜单选择 View → Assembly Display Options，在 Instance 中选择需要显示和隐藏的部件，这样便于操作。

2) 从主菜单选择 Tools → Surface → Manager，开始定义 Surface，单击左下角的 Create，命名这个面为 MASTER_SPRING_BOT，在 TYPE 选项中选择 MESH，单击 Continue，选择主簧的底面，单击 Done，完成第一个面的设置。在选择中，可以调节 Prompt area 中的 By angle 选项，通过设定角度来更方便地选择 Surface。

3) 用同样的方法，将垫块以及副簧的上下面定义 Surface，分别命名为 WASHER_BOT，WASHER_TOP，SLAVE_SPRING_BOT，SLAVE_SPRING_TOP。

4) 对于两个副簧支架与副簧接触的面，也同样定义相应的 Surface，命名为 SUPPORT_A，SUPPORT_B。

5) 单击工具箱中的 Creat Interaction Property，将其命名为 fric，单击 Continue，选择 Mechanical 选项中的 Tangential Behavior，在 Friction formulation 中选择 Penalty，将其摩擦系数定义为 0.2，如图 1-11 所示，单击 OK。

6) 单击工具箱中的 Creat Interaction，将接触对命名为 SPRING_2_SUPPORT_A，单击 Continue，然后单击提示栏右下角的 Surfaces 按钮，CAE 弹出 Region Selection 对话框，其中列出了刚才建立的 Surface，选择 SUPPORT_A，单击 Continue，提示栏会提示你选择相应的 SLAVE SURFACE，同样单击 SURFACE，选择 SLAVE_SPRING_TOP，单击 Continue，在 Contact interaction property 中选择我们刚刚建立的 CONTACT_PROP，同时在 Sliding formulation 中选择默认的 Finite sliding，其他设置如图 1-11 所示，则我们完成了副簧与其中一个副簧支架间接触关系的设置。

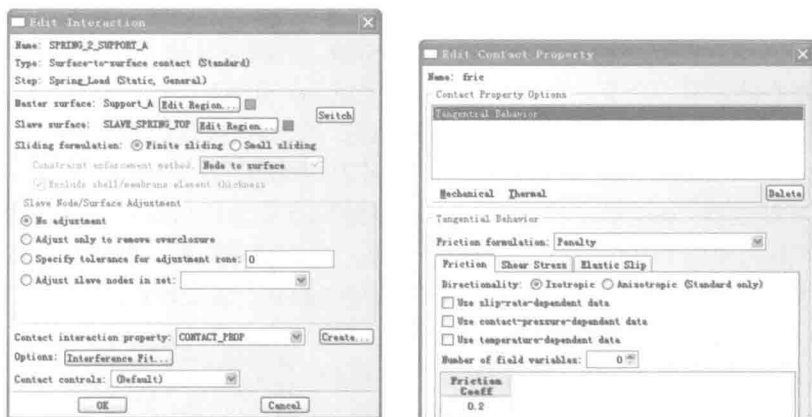



图 1-11 接触和接触属性的定义对话框

与此类似，我们可以在 SUPPORT_B 与 SLAVE_SPRING_TOP 之间设置相应的接触，接触参数设置与此完全相同。我们将其命名为 SPRING_2_SUPPORT_B。



7) 单击工具栏中的 Constraint Manager 按钮, 在对话框中单击左下角 Create 按钮, 选择 TIE, 单击 Continue。与以上步骤中的接触关系的建立类似, 单击提示栏右下角的 Surfaces 按钮, 选择 MASTER_SPRING_BOT 单击 Continue, 在提示栏按钮处单击 Surface, 从对话框中选择 WASHER_BOT, 单击 Continue, 在 Edit Constraint 对话框中接受其默认选择, 如图 1-12 所示, 单击 OK, 完成设置。我们在主簧于垫块之间设置了 TIE 接触。与此类似, 在垫块与副簧之间设置相应的 TIE 接触。

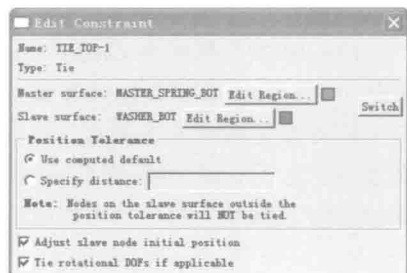


图 1-12 Constraint 定义对话框

至此, 我们完成了部件之间接触与 TIE 连接的设置。

接下来, 我们要定义, 主簧与主簧支架间的 Connector 连接来模拟二者之间的轴销连接。

8) 在 Tools 菜单中, 选择 Datum..., 在 Create datum 中选择 Midway between 2 points, 单击 Apply, 将提示栏中的 First point 和 Second point 分别选为孔上直径的两个节点, 则软件自动找到孔的圆心。选择 Tools 菜单中的, Reference point...选项, 单击刚才找到的圆心, 则此圆心变为一个参考点, 如图 1-13 所示。

9) 选择 Tools 菜单中的 Set 选项, 在 Create Set 中选择 Node, 将其命名为 SP1RING_1, 单击 Continue 后选择孔周围的节点, 如图 1-14 所示, 将其包含在此 Set 中。

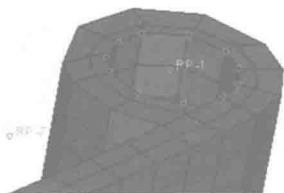


图 1-13 产生参考点的窗口

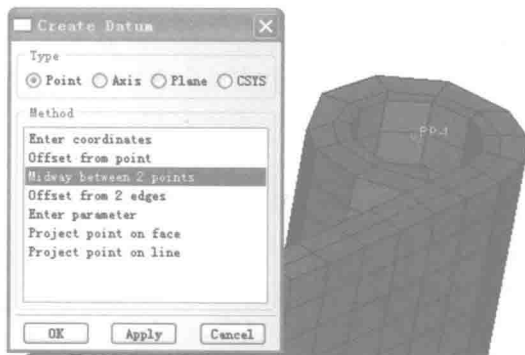


图 1-14 节点集 SP1RING_1 的图示及对话框

10) 单击工具箱中的 Create Constraint, 选择其中的 Coupling, 将其命名为 SP1NG_COUP_1, 单击 Continue, 在提示栏中选择 Geometry, 选择我们已经建立好的参考点。在提示栏中选择 Node region, 单击提示栏右下角的 Sets, Region Selection 对话框中选择 SP1NG_1, 接受 Edit Constraint 的其他选项, 如图 1-15 所示, 选择 OK, 完成 Coupling 的设置。

11) 与此类似, 将主簧与主簧支架上相互连接的各个孔都找到其圆心, 将圆心与其圆周上的点 Coupling 在一起, 使二者具有同样的运动状态。完成后, 我们将在主簧与主簧支架之间设置 Connector 单元。

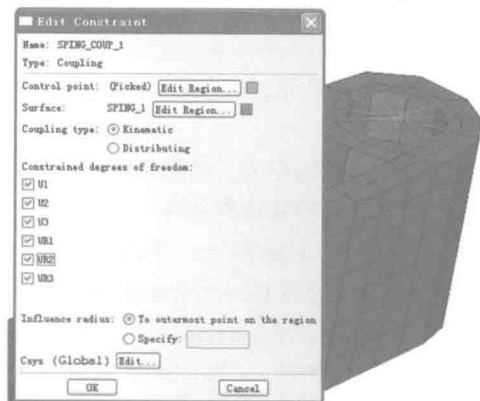


图 1-15 产生 Coupling 的对话框和图示

12) 单击工具箱中的 Create Connector Property, 将其命名为 LINK_PRO, 选择 Type 中的 Basic types, 在 Translational type 中选择 Link, 如图 1-16 所示, 单击 Continue, 然后单击 OK。

13) 单击工具箱中 Create Connector, 将其命名为 LINK_1, 单击 Continue, 在弹出的对话框中 Property 选择我们刚才建立的 LINK_PRO, 其中的 Edit Point1 与 Edit Point2 选择主簧与主簧支架上相应的参考点, 然后单击 OK。如图 1-17 所示, 则我们在主簧与右边的主簧支架之间建立了 Link 类型的 Connector 单元, 来模拟二者之间的连接关系 (详细的 Link 类型的 Connector 连接单元可以参考相应的手册)。同样的方法建立另外一个连接, 命名为 LINK_2。

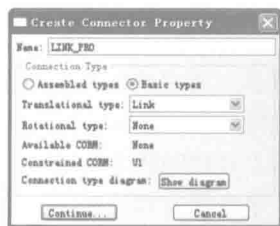


图 1-16 Connector Property 对话框

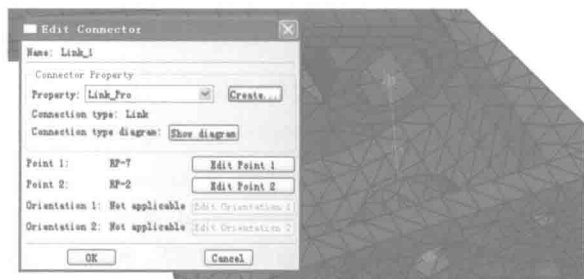


图 1-17 产生 LINK_PRO 的对话框和图示

14) 在 Tools 选择 Datum.. 选项, 进入 CSYS 中, 选择 3POINTS, 来建立局部坐标系, 单击 APPLY, 将其命名为 LCSYS, 单击 Continue, 通过 3 点来建立局部坐标系。其中坐标原点选为我们已经建立的一个参考点, X 方向与主簧孔的方向平行 (随后的 Hinge 类型的 Connector 要求建立局部坐标系, 其可以绕着局部坐标系的 X 轴转动), 另外一个点可以随便选。完成后如图 1-18 所示。

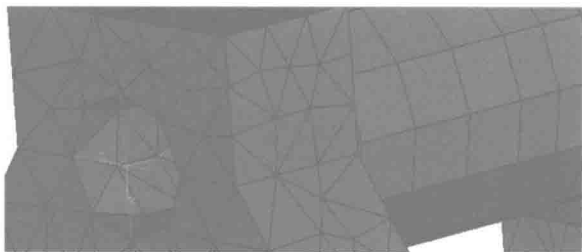


图 1-18 局部坐标系 LCSYS 图示

15) 单击工具箱中的 Create Connector Property, 将其命名为 HINGE_PRO, 选择 Type 中的 Assembled types 的 Hinge 类型, 单击 Continue, 然后单击 OK。

16) 单击工具箱中 Create Connector, 将其命名为 HINGE_1, 单击 Continue, 在弹出的对话框 Property 中选择刚才建立的 HINGE_PRO, Edit Point1 与 Edit Point 2 选择主簧与主簧支架上相应的参考点, 在 Orientation1 中选择已设置的局部坐标系, 然后单击 OK。则在主簧与左边的主簧支架之间建立了 Hinge 类型的 Connector 单元, 来模拟二者之间的连接关系。用同样的方法建立另外一个连接, 命名为 HINGE_2。

至此, 我们完成了模型部件之间连接接触关系的建立。

7. 定义载荷及边界条件

1) 进入 Load 模块, 单击工具栏的 Create Load 按钮, 进入 Create Load 对话框, 将其命名为 Load, 选择 Concentrated force, 单击 Continue, 在提示栏中选择 Mesh, 单击右下角的 Sets..., 在 Region Selection 对话框中选择 Load point, 单击 Continue。在 Edit Load 对话框中的 CF3 中输入 20000, 单击 OK, 完成载荷的添加, 如图 1-19 所示。即在此点加载一个沿 Z 方向的大小为 20000N 的集中力。



2) 与前面的技术类似, 建立一个 Node 的 Set, 其包括主副簧与大梁相铆接的所有的孔的圆周上的节点, 将其命名为 BC_NODES。

3) 单击工具栏的 Create Boundary Condition 按钮, 进入 Create Boundary Condition 对话框, 将其命名为 BC, 选择 Displacement/Rotation, 单击 Continue, 用同样的方法, 在 Region Selection 中选择我们刚刚建立的 BC_NODES, 在 Edit Boundary Condition 中选择 U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3, 即将此 Set 中节点的自由度全部限定。如图 1-20 所示, 单击 OK, 退出边界条件的设定。至此完成了模型边界的约束。

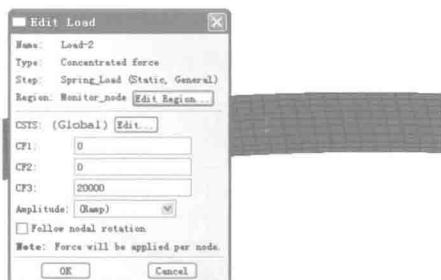


图 1-19 Load 的边界对话框和图示

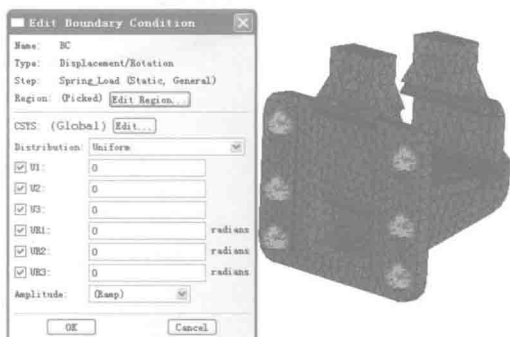


图 1-20 Boundary Condition 的边界对话框和图示

8. 递交作业并进行后处理

1) 进入 Job 模块, 单击工具栏的 Job Manager 按钮, 在 Job Manager 对话框中单击左下角的 Create, 命名为 SPRING, 单击 Continue, 接受所有默认的选择, 单击 OK, 完成 Job 的创建。

2) 在 Job Manager 对话框内单击右边第二个按钮 Submit, 提交作业。单击 Monitor 按钮可以观察作业运算的过程。

1.1.4 计算结果

整个计算过程较为顺利, 没有收敛性的问题出现, 图 1-21 所示为计算过程中生成的 sta 文件内容。

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)										
ABAQUS/STANDARD Version 6.5-1										
SUMMARY OF JOB INFORMATION:										
MONITOR NODE: 11348 DOF: 3										
STEP	INC	ATT	SEVERE DISCON	EQUIL	TOTAL	TOTAL	STEP	INC OF	DOF	IF
			ITERS	ITERS	ITERS	TIME/FREQ	TIME/LPF	TIME/LPF	MONITOR	RIRS
1	1	1	0	4	4	0.0100	0.0100	0.01000	3.20	
1	2	1	0	4	4	0.0200	0.0200	0.01000	6.66	
1	3	1	0	4	4	0.0350	0.0350	0.01500	11.9	
1	4	1	0	4	4	0.0575	0.0575	0.02250	20.2	
1	5	1	0	4	4	0.0912	0.0912	0.03375	33.2	
1	6	1	0	5	5	0.142	0.142	0.05063	53.0	
1	7	1	0	5	5	0.193	0.193	0.05863	74.7	
1	8	2	0	4	4	0.205	0.205	0.01266	79.9	
1	9	1	0	3	3	0.210	0.210	0.01266	85.0	
1	10	1	0	4	4	0.237	0.237	0.01090	92.6	
1	11	3	3	1	4	0.239	0.239	0.001700	93.0	
1	12	1	1	1	2	0.241	0.241	0.002670	93.6	
1	13	1	0	2	2	0.245	0.245	0.004005	94.4	
1	14	1	0	2	2	0.251	0.251	0.006007	95.7	
1	15	1	5	1	6	0.260	0.260	0.009010	97.4	
1	16	1	3	2	5	0.274	0.274	0.01352	98.9	
1	17	1	0	3	3	0.294	0.294	0.02027	101.	
1	18	1	0	3	3	0.324	0.324	0.03041	105.	
1	19	1	0	3	3	0.370	0.370	0.04561	110.	
1	20	1	0	4	4	0.439	0.439	0.06042	117.	
1	21	1	5	3	8	0.541	0.541	0.1026	129.	
1	22	1	7	3	10	0.695	0.695	0.1539	145.	
1	23	1	7	4	11	0.849	0.849	0.1539	159.	
1	24	1	5	3	8	1.00	1.00	0.1510	171.	

THE ANALYSIS HAS COMPLETED SUCCESSFULLY

图 1-21 计算过程中生成的 sta 文件

从图中可以看出来，整个计算平稳进行，最终完成计算。

图 1-22 所示为弹簧变形前后的位移图，图 1-23 所示为由上述结果得到的弹簧刚度曲线。由图可知，在整个工作过程中，主副簧产生较大的变形。弹簧刚度曲线也与理论情况符合较好。

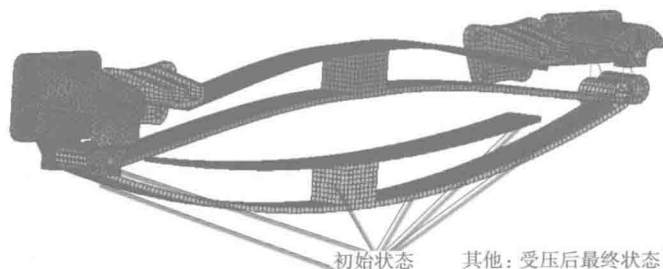


图 1-22 弹簧变形前后的位移图

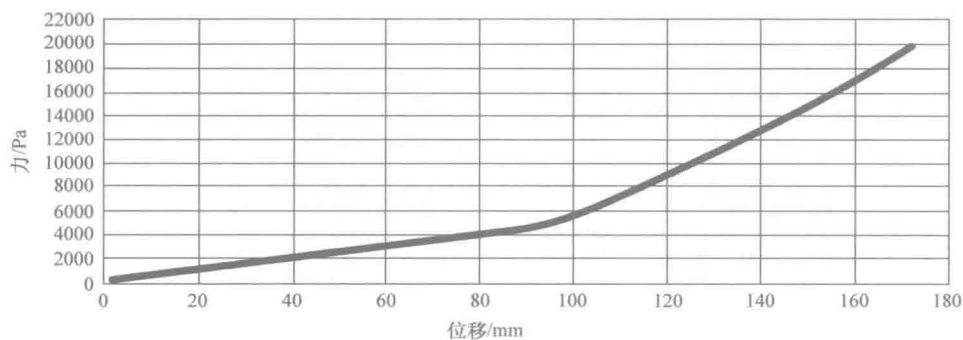


图 1-23 弹簧刚度曲线

1.2 进气管冷却盖垫片的模拟分析

1.2.1 引言

发动机系统中使用垫片部件是为了保证在各种工作载荷和环境条件下部件间有良好的密封性。不适宜的垫片其力学性能会使发动机的燃气压力降低和燃油泄漏，从而导致发动机性能的降低和潜在的发动机故障。本书中，垫片、发动机法兰和固定件统称为垫片装配连接件，如图 1-24 所示，在装配和后续的工作载荷工况下，由于螺距和法兰变形不一致，导致垫片装配连接件不能获得分布一致的接触压力，因此在确定发动机系统密封性能时必须对垫片密封件进行分析。

垫片密封件是由各种工程材料组成的，具有复杂的力学性能和截面，而且垫片的压缩响应是高度非线性的，用传统的建模方法和单元类型来模拟将会非常困难。Abaqus 采用专门的 GASKET 单元，通过压力—闭合曲线描述材料的力学性能，采用简单的建模方法，可以在发动机分析中方便地模拟垫片部件。压力—闭合曲线可以描述垫片在沿加载和卸载路径下非线性的弹性变形和永久的塑性变形，可通过试验获得。通过这种方法，利用垫片单元就可以有效地模拟复杂垫片厚度方向的特性。

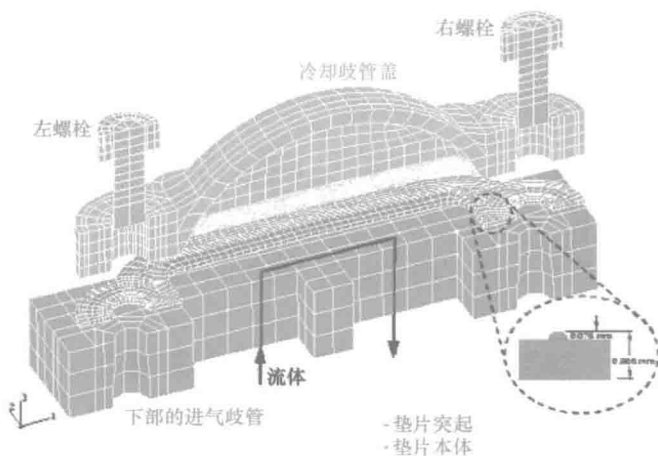


图 1-24 进气管 / 冷却盖垫片装配图

1.2.2 问题描述^①

发动机的进气歧管和冷却管之间通过纸制海绵的垫片来密封。其中垫片是由纸制海绵 (paper foam) 制成, 厚度为 0.79mm, 材料平整并可压缩, 同时在垫片上部有一个橡胶制的突起, 厚度为 0.076mm, 以提高垫片的密封性。垫片采用 Abaqus 软件中专门的垫片单元 GK3D8 和 GK3D6 来模拟。因为要评估垫片的密封性能, 需要准确的垫片“压力—闭合 (垫片上下表面之间的相对位移)”关系, 同时本体材料的可压缩性极强 (泊松比为 0.05), 由厚度方向的变形引起的面内形变可以不考虑, 因此通过单轴试验来确定垫片的压力—闭合量曲线, 而橡胶制突起的压力—闭合曲线也由单轴试验获得。

螺栓模型中螺杆的直径为 6.0mm, 螺栓头直径为 11.8mm。螺栓、冷却盖和进气歧管都是金属件, 采用 3D 实体单元 C3D8I 和 C3D6 分析。冷却盖厚度方向采用非协调性单元 C3D8I 来模拟它的弯曲, 更接近真实情况。

当要检验整个系统的密封性时, 必须对垫片装配件所在的各种机械工况和环境工况进行分析, 具体的分析步骤依次为: 装配螺栓载荷 (左右螺栓分别装配) 工况, 装配体升温至最高温度同时伴随内腔施加压力的工况, 装配体冷却至最低温度同时内腔压力恒定的工况, 返回至室温同时不考虑内腔压力工况, 最后拧开螺栓即卸载工况。

在各种工况下, 装配件需要定义真实的边界条件: 在对称平面上施加了沿对称方向的自由度被约束; 同时进气歧管底部的沿 3 方向的自由度被约束。

1.2.3 模型的建立

运行 Abaqus/CAE, 进入 Abaqus/CAE 的 Part 模块

1. 模型的导入

单击 File → Import → Model, 导入整个孤立网格模型, 包括两个连接螺栓, 铝制的冷却歧管盖, 带有突起的纸制垫片和钢制的下部进气歧管。导入的模型见图 1-24, 垫片的模型如图 1-25 所示。

① 本文中采用的统一单位为: N, MPa, mm, s, 1/°C。