

# 结构力学模块

简介

# 结构力学模块简介

© 1998–2018 COMSOL 版权所有

受列于 [cn.comsol.com/patents](http://cn.comsol.com/patents) 的美国专利 7,519,518、7,596,474、7,623,991、8,457,932、8,954,302、9,098,106、9,146,652、9,323,503、9,372,673 和 9,454,625 保护。专利申请中。

本文档和本文所述的程序根据《COMSOL 软件许可协议》([cn.comsol.com/comsol-license-agreement](http://cn.comsol.com/comsol-license-agreement)) 提供，且仅能按照许可协议的条款进行使用或复制。

COMSOL、COMSOL 徽标、COMSOL Multiphysics、COMSOL Desktop、COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关，亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 [cn.comsol.com/trademarks](http://cn.comsol.com/trademarks)。

版本：COMSOL 5.5

## 联系信息

请访问“联系我们”页面 [cn.comsol.com/contact](http://cn.comsol.com/contact)，以提交一般查询、联系技术支持或搜索我们的联系地址和电话号码。您也可以访问全球销售办事处页面 [cn.comsol.com/contact/offices](http://cn.comsol.com/contact/offices)，获取更多地址和联系信息。

如需联系技术支持，请访问 COMSOL Access 页面 [cn.comsol.com/support/case](http://cn.comsol.com/support/case)，创建并提交在线请求表单。其他常用链接包括：

- 技术支持中心：[cn.comsol.com/support](http://cn.comsol.com/support)
- 产品下载：[cn.comsol.com/product-download](http://cn.comsol.com/product-download)
- 产品更新：[cn.comsol.com/support/updates](http://cn.comsol.com/support/updates)
- COMSOL 博客：[cn.comsol.com/blogs](http://cn.comsol.com/blogs)
- 用户论坛：[cn.comsol.com/community](http://cn.comsol.com/community)
- 活动：[cn.comsol.com/events](http://cn.comsol.com/events)
- COMSOL 视频中心：[cn.comsol.com/video](http://cn.comsol.com/video)
- 技术支持知识库：[cn.comsol.com/support/knowledgebase](http://cn.comsol.com/support/knowledgebase)

文档编号：CM021105

# 目录

---

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 简介.....                   | 5  |
| 结构力学仿真 .....              | 5  |
| 结构力学模块物理场接口.....          | 9  |
| 基于空间维度和研究类型的物理场接口指南 ..... | 14 |
| 基本原理：静态线性分析.....          | 17 |
| 参数化研究.....                | 41 |
| 结构力学建模技巧 .....            | 51 |
| 包含预应变.....                | 52 |
| 热膨胀建模.....                | 59 |
| 案例库中的示例 .....             | 64 |



## 简介

“结构力学模块”是对结构力学和固体力学领域的应用和设计进行建模和仿真的定制模块。工程师和科研人员使用它来设计新的结构和设备，以及研究现有结构的性能。

您可以使用此模块在二维、二维轴对称和三维模式下对实体、壳（二维轴对称，三维）、板（二维）、桁架（二维、三维）、膜（二维轴对称、三维）和梁（二维、三维）执行静态和动态分析。材料模型包含线性描述，如线弹性和粘弹性材料模型。其他功能可用于研究热应力、几何非线性（大变形）以及结构接触。

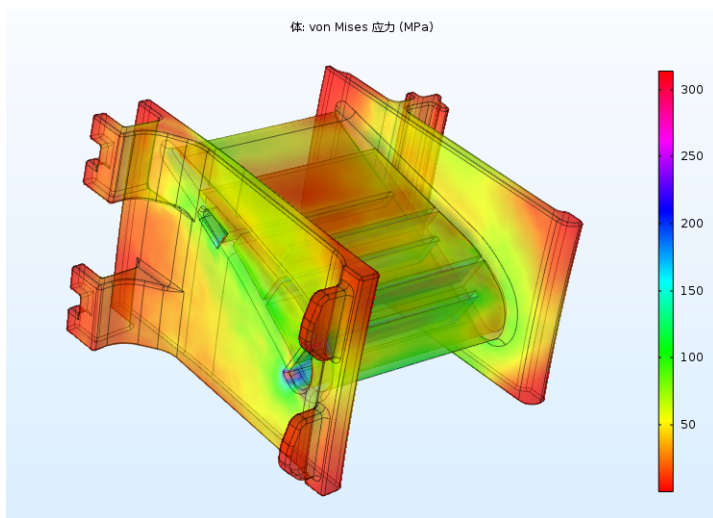


图1：涡轮定子模型中由热膨胀引起的 Von Mises 应力。来自“传热模块”案例库：涡轮静叶片的热应力分析 (*turbine\_stator*)。此模型使用了“结构力学模块”和“传热模块”。

“结构力学”物理场接口是该模块的主干。这些接口包含实现上述功能的预定义公式。本指南提供了这些物理场接口的概述，并包含相关建模操作过程的示例。

### 结构力学仿真

结构力学仿真的应用非常广泛 - 覆盖从微尺度的 MEMS 器件到土木工程的岩土力学范畴。这些类型的仿真也常用于研究现有结构（从微观生物结构到冰川）的特性。

结构力学是首个将有限元概念用作标准工具的工程领域。经过长时间的验证，发展出了许多适用于各种材料的公式。仿真通常可以取代实验测量。举例来说，有限元仿真已广泛用于航空航天和原子能工业的高安全性应用中。

结构分析工具的传统用法描述如下。我们要研究的设备是带螺栓法兰的管，这项研究的目的包含两方面：计算管中的应力以及评估螺栓连接的性能。图 2 显示管道中的变形（已放大）和 von Mises 应力。

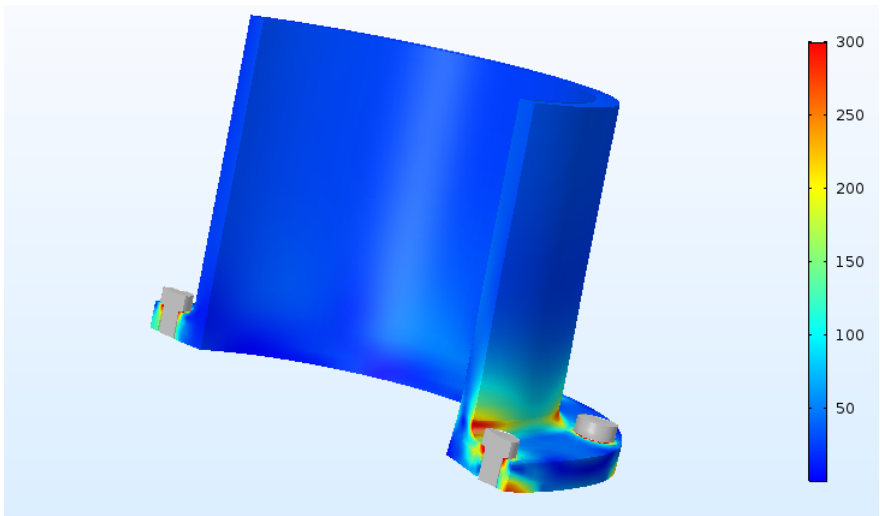


图 2：管道中的变形（已放大）和 von Mises 应力。来自“结构力学模块”案例库：管路连接处的预应力螺栓 (tube\_connection)。

图 3 显示了 MEMS 器件机械设计方面的非传统应用。通过对微执行器结构的零件施加电流，引起焦耳热，从而使微执行器发生可控热膨胀。热膨胀随后导致

该执行器发生挠曲，仿真可根据工作条件来预测这种挠曲。仿真还暴露了设计的限制，因为执行器的支脚一旦沿自由面发生接触，设备便不能正常工作。

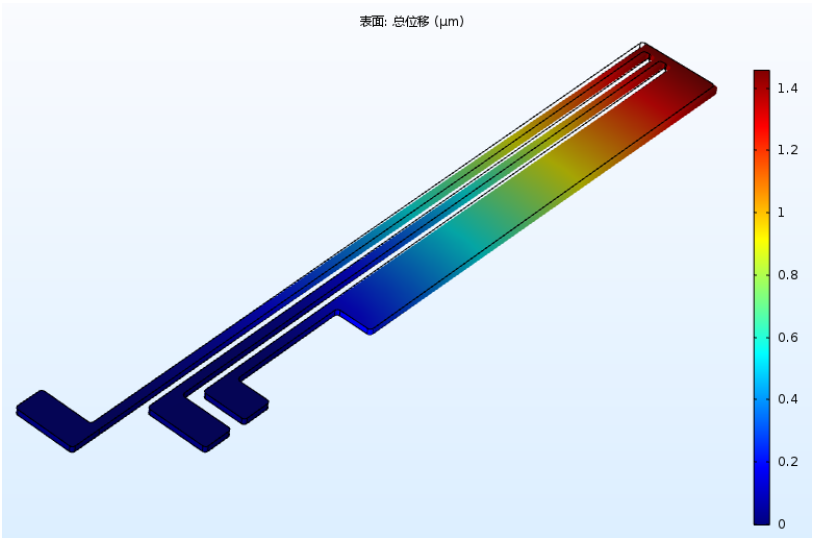


图3: MEMS 器件中的总位移。来自“MEMS 模块”案例库: 热执行器 (thermal\_actuator\_tem)。

结构分析在传统结构工程以外的领域也很重要，例如在生物科学方面。图 4 显示了一个幼儿体内血管系统一部分的仿真结果。仿真的目的是研究对一个主动脉畸形的小孩做手术时发生的情况。主动脉及其分支血管嵌入在生物组织中。在结构分析中，以面载荷的形式施加流体流动产生的压力。“结构力学模块”包含“流 - 固耦合”接口，这是专用于此类研究的预定义多物理场接口。

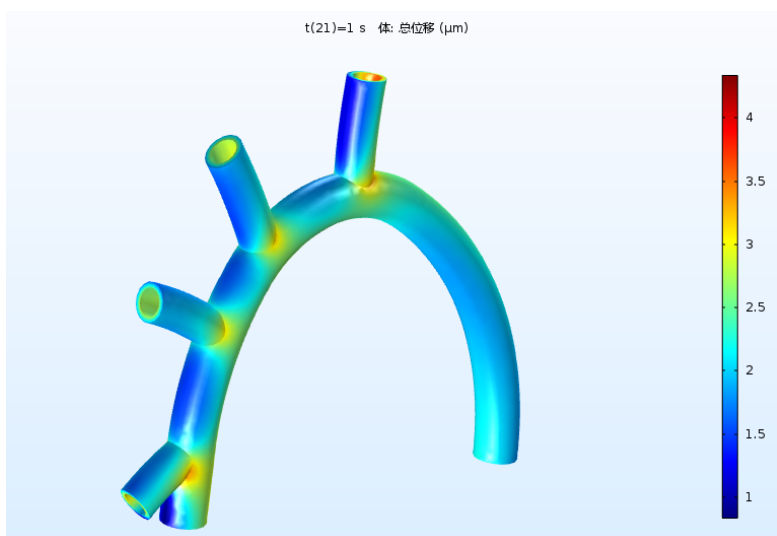


图4: 血管中的位移。来自“结构力学模块”案例库: 血管网络中的流 - 固耦合 (blood\_vessel)。



# 结构力学模块物理场接口

下图显示了 COMSOL “模型向导” 中与 “结构力学模块” 包含的物理场接口。除了结构力学功能，该模块还提供大量多物理场功能，包括 AC/DC、声学、CFD、传热、流 - 固耦合、焦耳热、压电及磁致伸缩。



图5：“结构力学模块”提供的三维和二维组件物理场接口。“多层壳”、“多体动力学”、“集总机械系统”、“转子动力学”、“多孔弹性”、“热弹性力学”、“磁致伸缩”、“压阻效应”、“机电”和“疲劳”接口均需额外的许可证。

接下来对 “结构力学” 接口进行简要描述。

## 固体力学

“固体力学”接口 () 定义用于应力分析和一般线性与非线性固体力学的物理量及特征。在二维模式下，可以使用平面应力、平面应变和广义平面应变公式。“线弹性材料”节点是默认的材料模型。弹性材料模型可通过以下特征进行扩展：热膨胀、吸湿膨胀、粘弹性、阻尼、预应力和预应变。模块中弹性材料的描述包括各向同性、正交各向异性和完全各向异性材料。材料可以根据时间或温度等因素被激活或停用。固体力学提供大量的预设研究类型（如下所示）。另请参见[基于空间维度和研究类型的物理场接口指南](#)。



*岩土力学、非线性结构材料、复合材料、多体动力学、转子动力学和疲劳*

“结构力学模块”包含六个辅助模块用于功能增强：“岩土力学模块”、“非线性结构材料模块”、“复合材料模块”、“多体动力学模块”、“转子动力学模块”和“疲劳模块”。

- 与“岩土力学模块”结合使用时，您可以在物理场接口中添加土壤塑性、非线性弹性、混凝土、岩石、脆性损伤以及专门的土壤模型，例如“硬化土壤”和“修正剑桥粘土”模型。

- 与“非线性结构材料模块”结合使用时，您可以为超弹性、非线性弹性、塑性、多孔塑性、蠕变、粘塑性、脆性损伤和形状记忆合金建模。
- 与“复合材料模块”结合使用时，您可以使用“多层壳”接口或通过“壳”接口中的特殊材料模型为多层壳建模。
- 利用“多体动力学模块”，您可以研究用不同类型的机械接头、齿轮、凸轮 - 从动件机构、弹簧及阻尼器连接的刚体和柔体。此外，您还可以为集总机械系统建模，这类系统通过质量、弹簧、阻尼或阻抗等分量定义。
- 您可以使用“转子动力学模块”研究转子动力学，包括高级轴承模型和齿轮。转子可以作为梁来建模，也可以通过三维实体进行建模。液体动压轴承也可用于固体力学和多体动力学模型。
- 利用“疲劳模块”，您可以通过低周疲劳和高周疲劳计算来加强应力分析。

本文档中所示菜单和窗口的具体内容根据您拥有的许可证而有所不同。即使文中的示例只需要“结构力学模块”，其中的所有插图均以假设具有相关附加模块为前提。

## 壳和板

“壳”接口 () 用于对薄壁结构进行结构分析。“壳”接口中使用的公式为 Mindlin-Reissner 类型，这说明该接口支持分析横向剪切变形。它既可用于研究非常厚的壳，也可用于研究薄壳。例如，可以规定与所选表面垂直方向的偏移，可在对导入的几何进行网格划分时使用此偏移。“壳”接口还包含其他特征，例如阻尼、热膨胀以及预应力和预应变。使用“复合材料模块”时，还可以分析多层壳。除“模态分析”和“螺栓预紧力”以外，可用的预设研究与“固体力学”接口的相同。

“板”接口 () 是三维“壳”接口的二维形式。板和壳类似，但位于单个平面且通常只施加面外载荷。此物理场接口的公式和特征与“壳”接口的类似。

## 膜

“膜”接口 () 用于薄膜结构，可视为具有面内及面外变形的三维弯曲平面应力单元。壳与膜之间的区别在于膜不具有任何抗弯刚度。薄膜和织物结构适合使用“膜”接口进行建模。借助“非线性结构材料模块”，除了默认的线弹性材料外，还可对超弹性、非线性弹性、塑性、蠕变及粘塑性进行建模。除“模态分析”、“线性屈曲”和“螺栓预紧力”以外，此物理场接口的预设研究与“固体力学”接口的相同。

## 梁

“梁”接口 () 用于对可完全由横截面属性（如面积和惯性矩）来描述的细长结构（梁）进行建模。“梁”接口使用埃爾米特单元和欧拉 - 伯努利或铁木辛柯理论来定义应力和应变。梁单元用于对平的和三维框架结构进行建模。此物理场接口还适用于对实体和壳结构的加强件进行建模，其中的库包含以下梁截面：矩形、箱形、圆形、管形、帽型、H 型、U 型、C 型及 T 型。其他特征还包括阻尼、热膨胀、预应力和预应变。除“模态分析”、“螺栓预紧力”和“预应力”研究类型以外，此物理场接口的预设研究与“固体力学”接口的相同。

## 梁横截面

“梁横截面”接口 () 是单独的二维物理场接口，可用于评估一般横截面的属性，以用作梁分析的输入。还可用于为梁执行详细的应力计算。

## 桁架

“桁架”接口 () 可用于对只承受轴向力的细长结构建模。桁架通过拉格朗日形函数进行建模，支持小应变和大变形的 **Green-Lagrange** 应变规范。除经典桁架结构外，此接口还可用于对受重力影响的电缆（下垂电缆）建模。其他特征还包括阻尼、热膨胀、预应力和预应变。默认的材料模型为线弹性，通过与“非线性结构材料模块”结合使用，还可以进行塑性建模。除“模态分析”和“螺栓预紧力”以外，此物理场接口的预设研究与“固体力学”接口的相同。

## 其他结构力学接口

“热应力”接口()将“固体力学”接口与“固体传热”接口进行组合。温度场自动与结构的热膨胀相耦合，并与任何温度相关的材料属性进行耦合。

“焦耳热和热膨胀”接口()将三个物理场接口组合到一起：“焦耳热”、“固体传热”和“固体力学”，用于描述结构中的电流传导、由欧姆损耗引起的后续电热以及温度场引起的热应力。

“压电器件”接口()将“固体力学”与“静电”接口进行组合，用于为压电材料建模。压电耦合可以是应力 - 电荷型或应变 - 电荷型。您可以从该物理场接口访问所有固体力学和静电功能，例如，对周围的线弹性固体或空气域进行建模。

“磁致伸缩”接口()将“固体力学”与“磁场”接口进行组合，用于为磁致伸缩材料建模。线性 and 非线性材料模型均可用。此接口需要 AC/DC 模块。

## 流体流动

“模型向导”的“流体流动”分支下提供多个“流 - 固耦合”(FSI)接口。这些接口将流体流动与结构力学相结合，以捕捉流体与结构之间的相互作用。在“流 - 固耦合”接口()中，“固体力学”接口和“单相流”接口分别用于模拟固体和流体。流动既可以是层流，也可以是湍流（后者需要“CFD 模块”）。FSI 耦合发生在流体与固体之间的边界上。“流 - 固耦合”接口使用任意拉格朗日 - 欧拉(ALE)法，将以欧拉描述和空间坐标系表示的流体流动和以拉格朗日描述和材料（参考）坐标系表示的固体力学组合到一起。

“流 - 固耦合，固定几何”()接口可用于对流体与可变形固体结构相互作用的现象进行建模。您可以同时考虑结构上的流体载荷以及传递到流体的结构速度这两个因素。该接口的建模基于以下假设：固体的位移足够小，因此在相互作用期间，流体域几何可以视为固定。

您也可以使用类似的接口将壳和膜与流体流动耦合。

## 基于空间维度和研究类型的物理场接口指南

下表列出 COMSOL Multiphysics 基本许可证提供的物理场接口以及特定于此模块的物理场接口。

| 物理场接口                                                                                         | 图标                                                                                  | 标记    | 空间维度        | 可用的研究类型                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>流体流动</b> |                                                                                     |       |             |                                                                                          |
| 流 - 固耦合 <sup>2</sup>                                                                          |    | —     | 三维、二维、二维轴对称 | 稳态；稳态，单向耦合；瞬态；瞬态，单向耦合                                                                    |
| 流 - 固耦合，固定几何 <sup>2</sup>                                                                     |    | —     | 三维、二维、二维轴对称 | 稳态；瞬态                                                                                    |
| 流体 - 壳相互作用 <sup>2</sup>                                                                       |    | —     | 三维、二维轴对称    | 稳态；稳态，单向耦合；瞬态；瞬态，单向耦合                                                                    |
| 流体 - 壳相互作用，固定几何 <sup>2</sup>                                                                  |    | —     | 三维、二维轴对称    | 稳态；瞬态                                                                                    |
| 流体 - 膜相互作用 <sup>2</sup>                                                                       |    | —     | 三维、二维轴对称    | 稳态；稳态，单向耦合；瞬态；瞬态，单向耦合                                                                    |
| 流体 - 膜相互作用，固定几何 <sup>2</sup>                                                                  |    | —     | 三维、二维轴对称    | 稳态；瞬态                                                                                    |
|  <b>结构力学</b> |                                                                                     |       |             |                                                                                          |
| 固体力学 <sup>1</sup>                                                                             |   | solid | 三维、二维、二维轴对称 | 稳态；特征频率；特征频率，预应力；模式分析；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；响应谱，线性屈曲；螺栓预紧力 |
| 热应力 <sup>2</sup>                                                                              |  | —     | 三维、二维、二维轴对称 | 稳态；瞬态                                                                                    |
| 焦耳热和热膨胀 <sup>2</sup>                                                                          |  | —     | 三维、二维、二维轴对称 | 稳态；瞬态                                                                                    |

| 物理场接口 | 图标                                                                                  | 标记    | 空间维度         | 可用的研究类型                                                                       |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 壳     |    | shell | 三维           | 稳态；特征频率；特征频率，预应力；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；响应谱；线性屈曲 |
| 板     |    | plate | 二维           | 稳态；特征频率；特征频率，预应力；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；响应谱；线性屈曲 |
| 梁     |    | beam  | 三维、二维        | 稳态；特征频率；频域；频域，模态；瞬态；瞬态，模态；模态降阶模型；线性屈曲                                         |
| 梁横截面  |    | bcs   | 二维           | 稳态                                                                            |
| 桁架    |    | truss | 三维、二维        | 稳态；特征频率；特征频率，预应力；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；响应谱；线性屈曲 |
| 膜     |  | mbrn  | 三维、二维<br>轴对称 | 稳态；特征频率；特征频率，预应力；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；响应谱      |

| 物理场接口                                                 | 图标                                                                                | 标记 | 空间维度        | 可用的研究类型                                                                         |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|-------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 压电器件 <sup>2</sup>                                     |  | —  | 三维、二维、二维轴对称 | 稳态；特征频率；特征频率，预应力；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；小信号分析；线性屈曲 |
| 磁致伸缩 <sup>2</sup>                                     |  | —  | 三维、二维、二维轴对称 | 稳态；特征频率；瞬态；频域；小信号分析，频域；特征频率，预应力；频域，预应力；                                         |
| <sup>1</sup> 此物理场接口随核心 COMSOL 软件包一起提供，并添加了针对此模块的功能。   |                                                                                   |    |             |                                                                                 |
| <sup>2</sup> 此物理场接口是预定义的多物理场耦合，可以自动添加所有需要的物理场接口及耦合特征。 |                                                                                   |    |             |                                                                                 |



## 基本原理：静态线性分析

本节汇总了结构力学问题建模的基础知识，以及如何在 COMSOL Multiphysics 的“结构力学模块”中应用它们。其中包含创建几何、生成网格、定义材料属性和边界条件的操作说明。计算出解以后，我们将学习如何显示并分析结果。本指南中使用的模型是支架及其安装螺栓的装配，所用材料都是钢。这种支架可用于安装执行器，该执行器固定在支架臂上两孔之间的销上。该几何结构如图 6 所示。

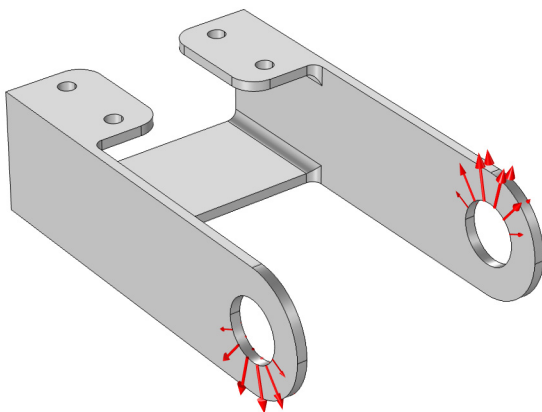


图 6：支架几何与载荷分布。

在此初始分析中，假设安装螺栓是固定的，并牢固地连接到支架，因此，它们将替换为螺栓孔的边界条件。要为销施加的外部载荷建模，在两个孔的内表面上指定三角分布的表面压力  $p$ ，由下式给出：

$$p = P_0 \cos(\alpha) \quad -\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}$$

其中， $P_0$  表示最大载荷强度， $\alpha$  表示与合成载荷方向的夹角。一个臂的载荷向上，另一个的载荷向下。载荷分布如图 6 所示。

## 模型向导

---

构建模型的第一步是打开 COMSOL，然后指定所需的分析类型 - 在本例中为稳态、固体力学分析。

**注：**这些操作说明基于 Windows 用户界面，但同样适用于 Linux 和 Mac 系统，只是略有不同。

- 1 双击桌面上的 COMSOL 图标以启动软件。软件打开后，您可以选择使用“模型向导”来创建新的 COMSOL 模型，也可以使用“空模型”手动进行创建。

对于本教程，单击“模型向导”按钮。

如果 COMSOL 已打开，要启动“模型向导”，可以从“文件”菜单中选择“新建”，然后单击“模型向导”。

“模型向导”会引导您完成建立模型的最初几个步骤。接下来的窗口可供您选择建模空间的维度。

- 2 在“选择空间维度”页面单击“三维”。
- 3 在“选择物理场”树的“结构力学”下，单击“固体力学 (solid)”。  
“添加”，然后单击“研究”。
- 4 在“选择研究”树的“一般研究”分支下，单击“稳态”。
- 5 单击“完成”。

## 全局定义 - 参数

---

较好的建模操作是将常数和参数收集到一起，以便对它们轻松进行更改。使用参数还能提高输入数据的可读性。

我们将定义以下参数：最大载荷强度  $P_0$  与销孔中心的  $y$  坐标  $Y_C$ 。

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“参数” 并选择“参数 1”。

**注：**在 Linux 和 Mac 上，“主屏幕”工具栏是指 Desktop 顶部附近的一组特定控件。

- 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        |
|----|----------|----------|-----------|
| P0 | 2.5[MPa] | 2.5E6 Pa | 最大载荷强度    |
| YC | -300[mm] | -0.3 m   | 孔中心的 Y 坐标 |

表格的第三列将自动填充。

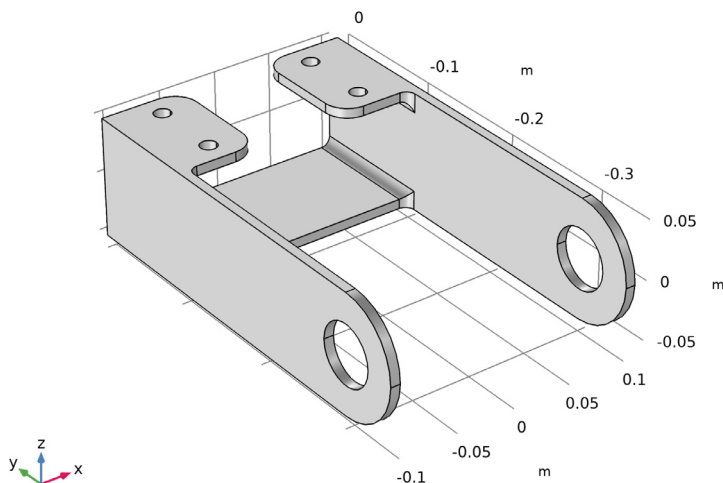
## 导入几何

下一步是创建几何，也可以从外部程序导入。COMSOL Multiphysics 支持多种 CAD 程序和文件格式。在本例中，导入的文件是 COMSOL Multiphysics 几何文件格式 (.mphbin)。该文件包含支架和安装螺栓的装配。

**注：**本练习中所用文件的位置根据安装目录的不同而有所变化。例如，如果安装在硬盘上，文件路径应类似于 `C:\Program\COMSOL54\Multiphysics\applications\Structural_Mechanics_Module\Tutorials`。

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“导入”。
- 2 在“导入”的“设置”窗口中，定位到“导入”栏。
- 3 从“源”列表中选择“COMSOL Multiphysics 文件”。
- 4 单击“浏览”。
- 5 浏览至 COMSOL 安装目录下的文件夹 `Structural_Mechanics_Module\Tutorials`，并双击文件 `bracket.mphbin`。

## 6 单击“导入”。



可以在整个组件中自动创建自由四面体网格。不过，这种策略对于大平面区域而言并不是最佳选择。为此，建议您分割几何以便创建更优化的网格。

对于这种小线性问题，使用非常细化的四面体网格仍然会更加高效，但这里演示的方法适用于更一般的情况。

### 1 在“几何”工具栏中选择“长方体”.

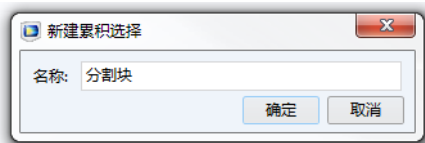


### 2 在“长方体”的“设置”窗口中，定位到“结果实体的选择”栏。

### 3 单击“新建”。

### 4 在“新建累积选择”对话框的“名称”文本框中键入“分割长方体”。

### 5 单击“确定”。



**6** 定位到“大小和形状”栏，并输入以下所示的值。

▼ 大小和形状

宽度:  m

深度:  m

高度:  m

▼ 位置

基: 

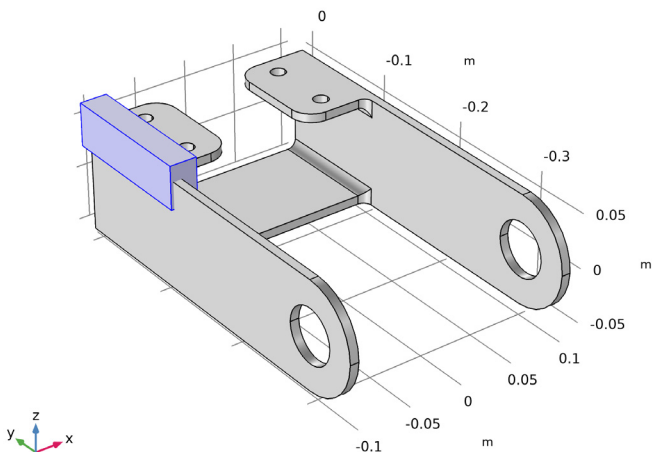
角 ▼

x:  m

y:  m

z:  m

此时您已创建一个长方体，它所包裹的几何零件具有更复杂的几何结构，因此需要自由四面体网格。现在，为该长方体生成两次镜像，使其覆盖在所有四个圆角上。



7 在“几何”工具栏中，单击“变换” 并选择“镜像”。

**8** 在“镜像”的“设置”窗口中，定位到“输入”栏。从“输入对象”列表中选择“分割长方体”。

9 选中“保留输入对象”复选框。

**10** 定位到“结果实体的选择”栏。从“贡献”列表中选择“分割长方体”。单击“构建选定对象”。

**11** 在“几何”工具栏中，单击“变换” 并选择“镜像”。

- 12 在“镜像”的“设置”窗口中，定位到“输入”栏。
- 13 从“输入对象”列表中选择“分割长方体”。
- 14 选中“保留输入对象”复选框。
- 15 定位到“反射平面法矢”栏。在 x 文本框中键入 1。在 z 文本框中键入 0。
- 16 定位到“结果实体的选择”栏。从“贡献”列表中选择“分割长方体”。单击“构建选定对象” 。

## 分割对象

- 1 在“几何”工具栏中，单击“布尔操作和分割”  并选择“分割对象” 。
- 2 在“分割对象”的“设置”窗口中，定位到“分割对象”栏。在“要分割的对象”中选择 **imp1**。

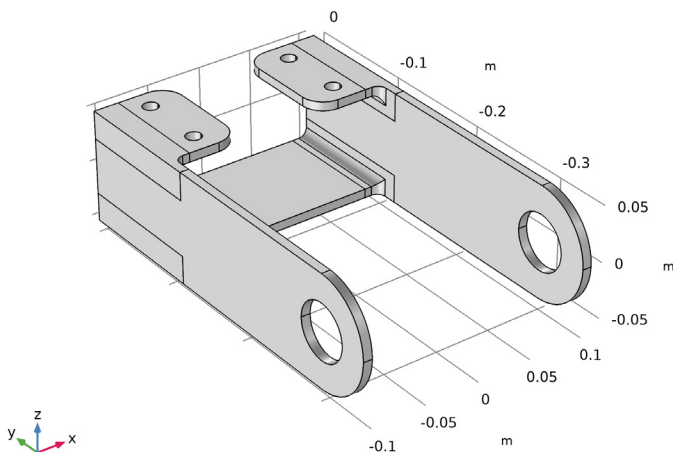
**注：**选择几何实体的方式有多种。当您知道要添加的几何实体时，例如本文的练习，可以单击“粘贴选择”按钮 ，然后在“选择”文本框中输入信息。本例中，’ **imp1**’ 是整个支架，因此将其选中的最快方法是在图形窗口中单击它。

有关在“图形”窗口中选择几何实体的更多信息，请参阅 COMSOL Multiphysics Reference Manual。



- 3 在“工具对象”子栏中选择“活动”切换按钮。然后，从“工具对象”列表中选择“分割长方体”。
- 4 单击“构建选定对象” 。

该实体几何现已分割成九个单独的域，其中五个是厚度恒定的薄对象。



### 形成联合体 (fin)

- 1 在“模型开发器”下的“组件 1 (comp1) > 几何 1”中，右键单击“形成联合体 (fin)”，并选择“构建选定对象”（或单击“设置”窗口中的按钮）。
- 2 在“图形”工具栏中单击“缩放到窗口大小”按钮.

您可以使用“形成联合体”节点确定在分析中如何处理装配的各个零件。使用默认设置“形成联合体”时，任何相邻域都将连接在一起，并假设内部边界连续。如果改为选择“形成装配”，则不同的零件不会相互连接，此时可对结构接触建模。在这种情况下，还可以将节点重命名为“形成装配”，以便通过查看几何序列来了解模型当前的状态。

## 定义 - 函数和选择

在这一部分，我们将定义表达式，用于将载荷施加到承载的孔。假设使用三角函数来定义载荷分布。

## 解析 1 (an1)

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“函数”，并在“局部”下选择“解析”。



- 2 在“解析”“设置”窗口的“函数名称”文本框中键入 load。
- 3 定位到“定义”栏。在“表达式”文本框中键入  $F \cdot \cos(\text{atan2}(\text{py}, \text{abs}(\text{px})))$ （或复制粘贴此文本）。
- 4 在“变元”文本框中键入 F, py, px。
- 5 定位到“单位”栏。在“变元”文本框中键入 Pa, m, m。
- 6 在“函数”文本框中键入 Pa。



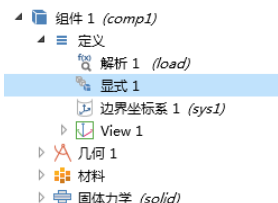
不论是模型看作单个实体还是装配，您可能都需要访问各个零件来进行定义，比如，对相似的边界条件定义多个明细。您可以通过多种不同的方式来创建选择，例如，通过对象的显式选择或几何位置。框选择与几何无关，您可以在更改几何拓扑结构时仍保留所需的选择。

在本例中，一个选择包含螺栓域，另一个选择包含销孔的承载边界。

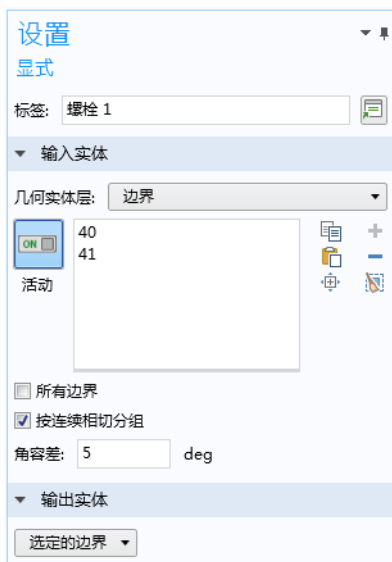


## 显式 1

- 1 在“定义”工具栏中单击“显式”。“定义”节点下会添加一个“显式”节点。



- 2 在“显式”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入螺栓 1。也可以单击任意节点并按 F2 来重命名，或右键单击并选择“重命名”。
- 3 定位到“输入实体”栏。从“几何实体层”列表中选择“边界”。
- 4 仅选择“边界” 41。
- 5 选中“按连续相切分组”复选框，即可将边界 40 添加到选择列表中。



## 显式 2、显式 3 和显式 4

重复“显式 1”中完成的步骤，以添加所有四个“显式”节点.

- 1 在“定义”工具栏中，单击三次“显式”.
- 2 在“模型开发器”中，单击下一个“显式”节点以打开“设置”窗口。如下表所示，编辑“设置”窗口。

3 参考下表，在“图形”窗口中选择相应的边界。单击以选中每个节点的“按连续相切分组”复选框。

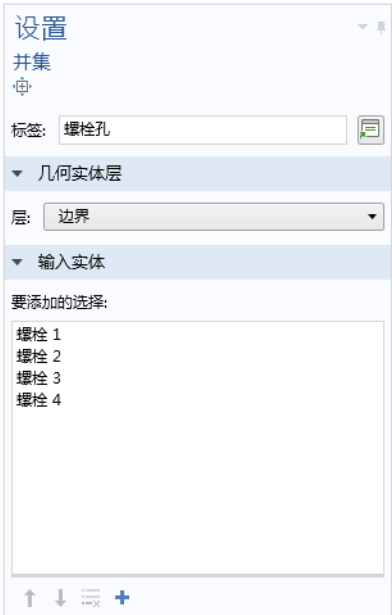
| 默认节点标签 | 新节点标签 | 几何实体层 | 选择边界 |
|--------|-------|-------|------|
| 显式 2   | 螺栓 2  | 边界    | 43   |
| 显式 3   | 螺栓 3  | 边界    | 55   |
| 显式 4   | 螺栓 4  | 边界    | 57   |

此时，“定义”下的节点序列应如下所示：



并集 1

- 1 在“定义”工具栏中单击“并集”.
- 2 在“并集”“设置”窗口的“标签”文本框中，输入螺栓孔。
- 3 定位到“几何实体层”栏。从“层”列表中选择“边界”。
- 4 定位到“颜色”栏。在 Windows 上，选择调色板第一行的第八种颜色（橙色）。在其他平台上，从“颜色”列表中选择“颜色 8”。
- 5 定位到“输入实体”栏。在“要添加的选择”下单击“添加”按钮.
- 6 在“添加”对话框的“要添加的选择”列表中，选择“螺栓 1”、“螺栓 2”、“螺栓 3”和“螺栓 4”。
- 7 单击“确定”。

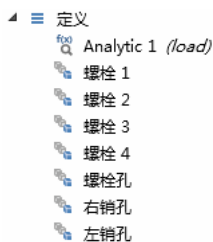


### 显式 5

- 1 在“定义”工具栏中单击“显式”.
- 2 在“显式”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入右销孔。
- 3 定位到“输入实体”栏。从“几何实体层”列表中选择“边界”。
- 4 仅选择“边界”4。
- 5 选中“按连续相切分组”复选框。
- 6 定位到“颜色”栏。在 Windows 上，选择调色板第一行的第九种颜色（绿色）。在其他平台上，从“颜色”列表中选择“颜色 9”。

### 显式 6

重复上述步骤，但使用标签左销孔，选择边界 75，并使用“颜色 12”（红色）。现在，“定义”节点下的序列应如下所示：



## 材料

COMSOL Multiphysics 为许多常用材料配备了内置的材料属性。在此，选择结构钢。材料会自动指派到所有域。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加材料”以打开相应的窗口。
- 2 在“添加材料”窗口的“内置材料”下，单击 Structural steel。
- 3 单击“添加到组件”按钮 .
- 4 在“主屏幕”工具栏中，再次单击“添加材料”以关闭该窗口。

## 固体力学

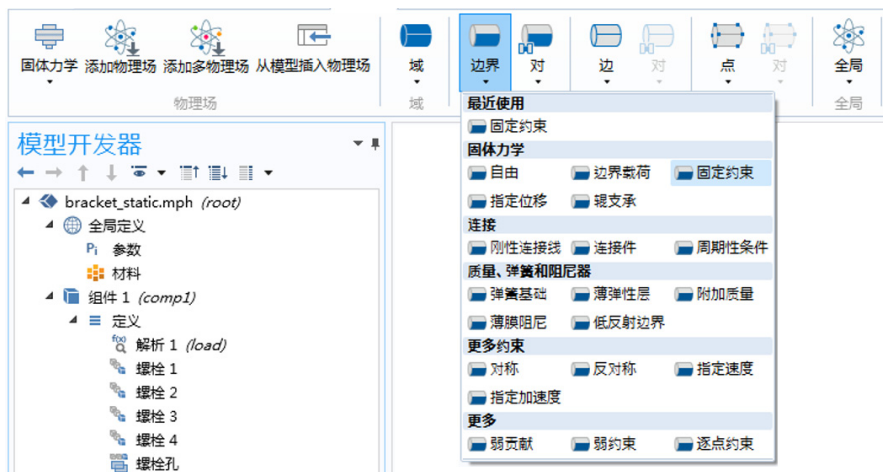
接下来，定义物理场设置，例如材料模型、载荷及约束。最初，我们已使用与固体力学关联的经典方程将分析指定为稳态。

默认情况下，“固体力学”接口假设材料为线弹性，这一点适用于本例。现在，我们只需设置约束和载荷即可完成相关操作。

### 固定约束 1

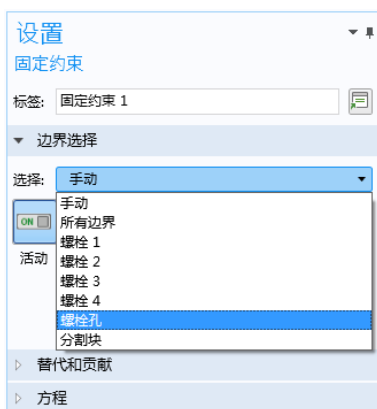
假设螺栓孔的边界已完全约束。

1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“固定约束”。



2 在“固定约束”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。

- 3 从“选择”列表中，选择“螺栓孔”。



### 边界载荷 1

沿法向对支架孔施加边界载荷。使用内置边界坐标系可以完成此操作。

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“边界载荷”.
- 2 在“边界载荷”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“右销孔”。
- 4 定位到“坐标系选择”栏。
- 5 从“坐标系”列表中，选择“边界坐标系 1 (sys1)”。载荷输入现已在此坐标系中完成，您可以直接访问边界法向。
- 6 定位到“力”栏。将  $\mathbf{F}_A$  矢量指定为：

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 0                                     | t1 |
| 0                                     | t2 |
| $\text{load}(-P0, Y-YC, Z) * (Z < 0)$ | n  |

请注意，为了提供载荷分布，这里需要正确调用先前定义的函数 ‘load()’。此外，通过与布尔表达式  $Z < 0$  相乘，将载荷限制为作用于孔的下半部分。

### 边界载荷 2

- 1 右键单击“边界载荷 1”并选择“生成副本”。
- 2 在“边界载荷”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。
- 3 从“选择”列表中选择“左销孔”。
- 4 由于左孔的上半部分已施加载荷，因此将载荷表达式改为  $\text{load}(-P0, Y-YC, Z) * (Z > 0)$ 。

## 网格 1

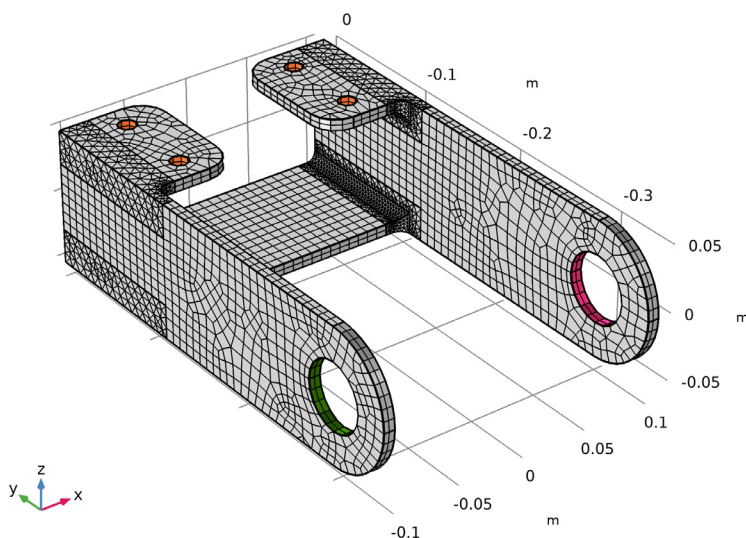
---

创建通过薄的平整零件扫掠的网格，然后为其余更复杂的几何结构使用自由四面体网格。请注意，这两种类型的单元之间可以自动过渡。

### 扫掠 1

- 1 在“网格”工具栏中单击“扫掠”.
- 2 在“扫掠”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。从“几何实体层”列表中选择“域”，然后选择域 1、4、5、6 和 9。
- 3 单击以展开“源面”栏。选择“边界” 1、33、37、50 和 72。
- 4 在“模型开发器”中，右键单击“扫掠 1”并选择“大小”.
- 5 在“大小”的“设置”窗口中，定位到“单元大小”栏。单击“定制”按钮。
- 6 定位到“单元大小参数”栏。选中“最大单元大小”复选框。在关联文本框中键入 8[mm]。
- 7 单击“构建选定对象”.
- 8 在“网格”工具栏中单击“自由四面体网格”。默认选择为“剩余”，即尚未划分网格的所有域。
- 9 在“模型开发器”中，右键单击“自由四面体网格”并选择“大小”.
- 10 在“大小”的“设置”窗口中，定位到“单元大小”栏。从“预定义”列表中选择“较细化”。
- 11 单击“全部构建”.

此时的网格应如下所示：

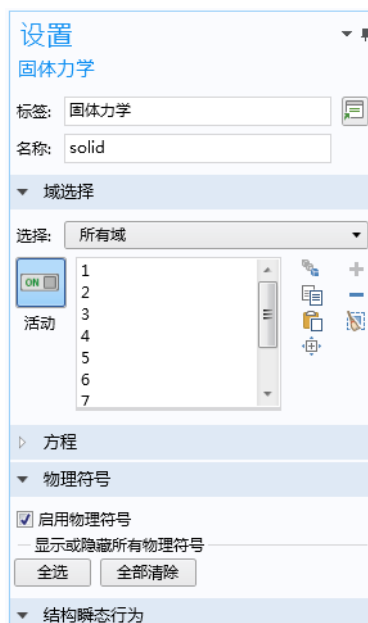


在图形窗口中显示物理符号

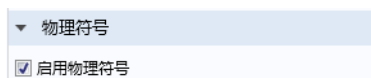
在处理物理场特征时，选择会显示在“图形”窗口中。您可以添加符号来描述应用到选择的条件类型。

这些符号仅表明应用到模型的设置类型，而非实际大小或方向。如果要将实际施加的载荷进行可视化，必须先计算解。

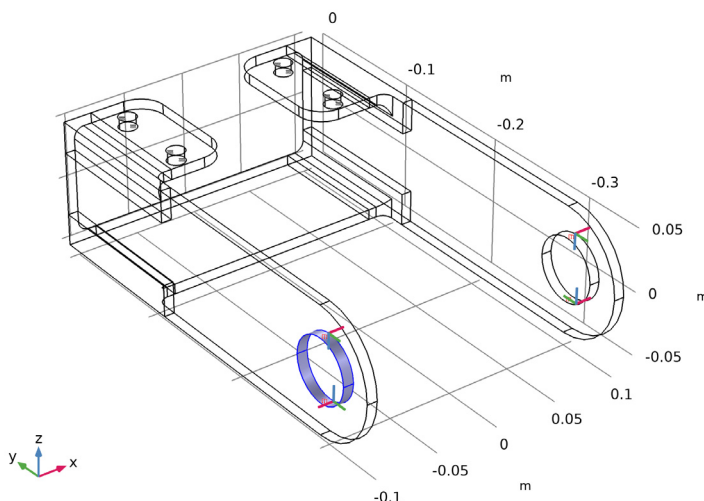
您可以在物理场接口设置中选中“启用物理符号”来显示物理符号。



为接口启用物理符号后，会在“模型开发器”树的每个节点设置中显示“物理符号”栏。随后，您便能控制各个边界条件的物理符号状态。



您可以单击“线框渲染”按钮  来查看各个位置的符号。



## 研究

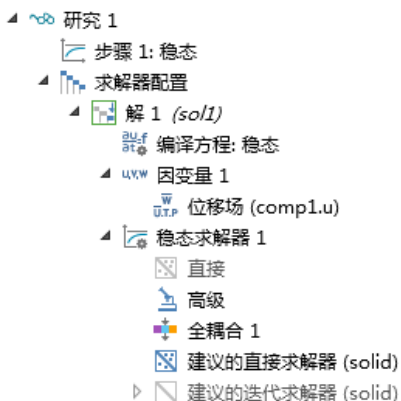
您可以计算初始值来检查载荷分布。对于大型模型来说，这种方法比计算实际解要快得多，但仅适用于载荷与解不相关的情况。以下步骤显示如何对当前几何中的载荷分布进行可视化。



1 在“研究”工具栏中单击“获取初始值”。

“研究”节点会基于选定的物理场接口（固体力学）和研究类型（稳态）自动定义仿真的求解器序列。如果尚未创建网格，“研究”节点会在定义求解器序列的同时自动生成网格。

**注：**在实际操作中，不要太过依赖于标准网格设置。对于大多数实际问题，应通过“网格”工具栏设置合适的网格划分参数。



## 结果

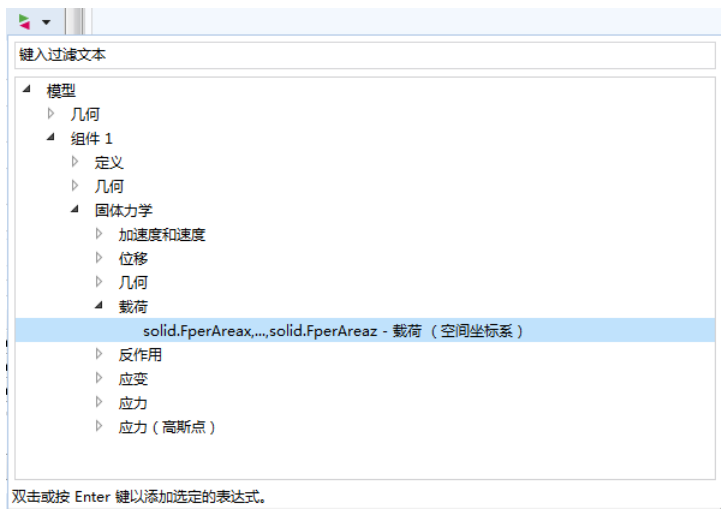
在初始状态，所有应力均为零。添加“面上箭头”图以显示施加的载荷。

### 应力 (solid)

1 在“应力 (solid)”工具栏中，单击“面上箭头”（或在“模型开发器”的“结果”节点下，右键单击“应力 (solid)” 并选择“面上箭头”）。



- 2 在“面上箭头”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏。单击“替换表达式”，并从结果列表中选择“载荷”。



**注：**您可以通过在搜索编辑框中输入表达式的部分名称来过滤结果。

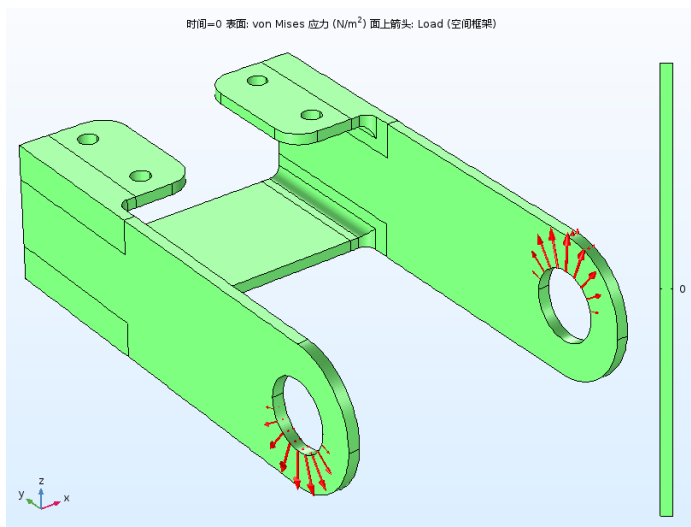
如果您知道要使用的变量的名称，也可以手动键入它们。在本例中，可以执行以下操作：

- 在“X 分量”文本框中键入（或复制粘贴）`solid.FperAreax`。
- 在“Y 分量”文本框中键入 `solid.FperAreay`。
- 在“Z 分量”文本框中键入 `solid.FperAreaz`。

- 3 在“着色和样式”栏，从“位置”列表中选择“网格节点”。

- 4 单击“绘制”按钮 。

现在，您可以在“图形”窗口中检查外加载荷的分布是否符合预期。



## 研究

---

求解模型。在“主屏幕”或“研究”工具栏中，单击“计算”。求解该问题需要几秒钟的时间。

## 结果

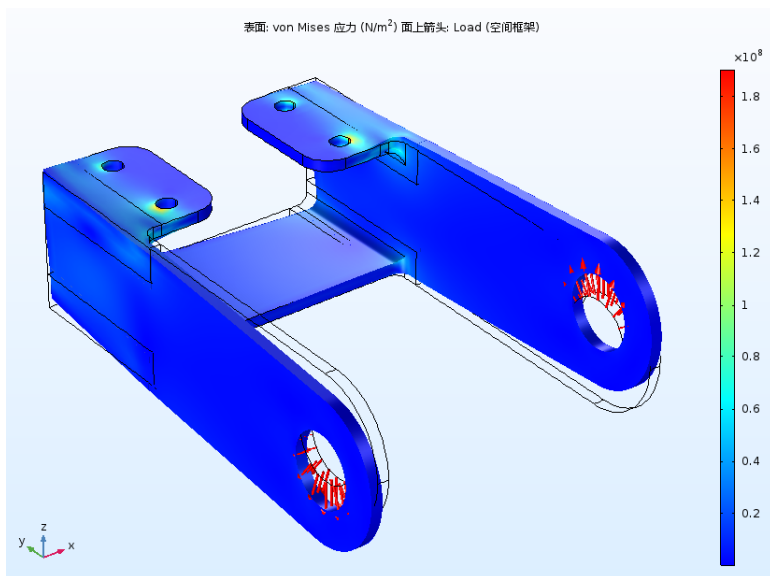
---

### 应力 (solid)

- 1 展开“应力 (solid)”节点，然后单击“表面 1”。
- 2 在“表面”的“设置”窗口中，定位到“表达式”设置栏。
- 3 从“单位”列表中选择 MPa。

- 4 在“图形”工具栏中单击“缩放到窗口大小”按钮 。

默认绘图显示 von Mises 应力分布和放大（自动缩放）的变形图。高应力值位于安装螺栓附近和板之间的过渡区。请注意，默认情况下，系统在未变形的结构上绘制您之前添加的力箭头。



### 三维绘图组 2

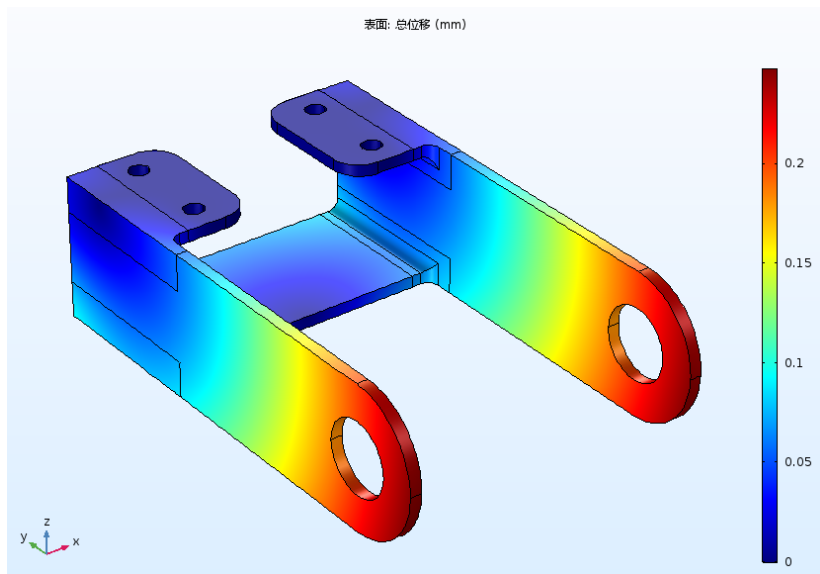
添加一个绘图组来显示支架位移。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加绘图组”  并选择“三维绘图组” 。
- 2 在“三维绘图组 2”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入总位移。单击 Desktop 上的任意位置即可使设置生效。

### 总位移

- 1 在“总位移”工具栏中单击“表面” 。或右键单击“总位移”并选择“表面”。
- 2 在“表面”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏。请注意，总位移 `solid.disp` 已选作默认结果。
- 3 从“单位”列表中，选择 mm（或在文本框中输入 mm）。

- 4 在“总位移”工具栏中，单击“绘制”。也可以在“表面”的“设置”窗口中单击“绘制”。



### 三维绘图组 3

创建第三个绘图以显示主应力。

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加绘图组” 并选择“三维绘图组”。
- 2 在“三维绘图组 3”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入主应力。

### 主应力

- 1 在“主应力”工具栏中，单击“更多绘图”，并选择“体主应力”。

2 在“体主应力”的“设置”窗口中，找到“定位”栏。遵循以下操作输入值，替换默认值：

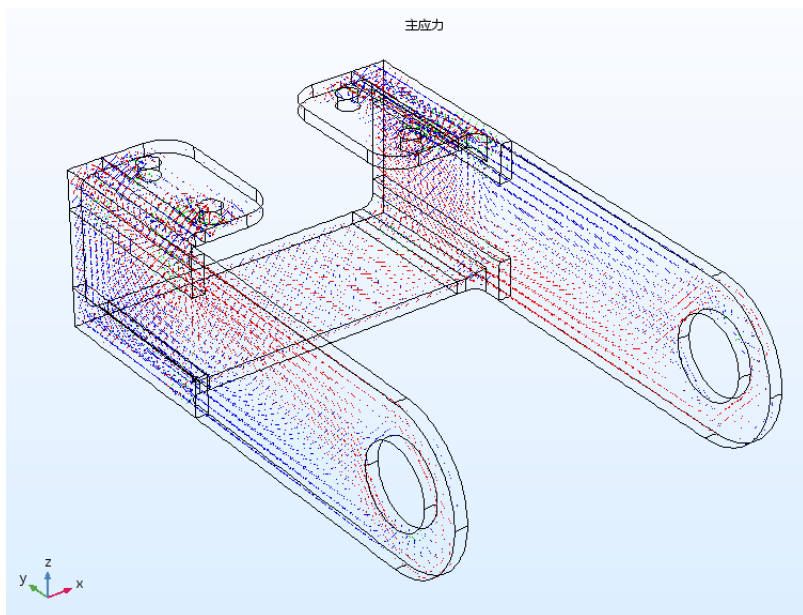
- 找到“X 栅格点”子栏。在“点”文本框中键入 30。
- 找到“Y 栅格点”子栏。在“点”文本框中键入 60。
- 找到“Z 栅格点”子栏。在“点”文本框中键入 15。

3 定位到“着色和样式”栏。从“箭头长度”列表中选择“对数”。

4 在“主应力”工具栏中，单击“绘制”



|         |     |
|---------|-----|
| ▼ 定位    |     |
| — X 栅格点 |     |
| 定义方法:   | 点数  |
| 点:      | 30  |
| — Y 栅格点 |     |
| 定义方法:   | 点数  |
| 点:      | 60  |
| — Z 栅格点 |     |
| 定义方法:   | 点数  |
| 点:      | 15  |
| ▼ 着色和样式 |     |
| 箭头类型:   | 箭头  |
| 箭头长度:   | 对数  |
| 范围商数:   | 100 |

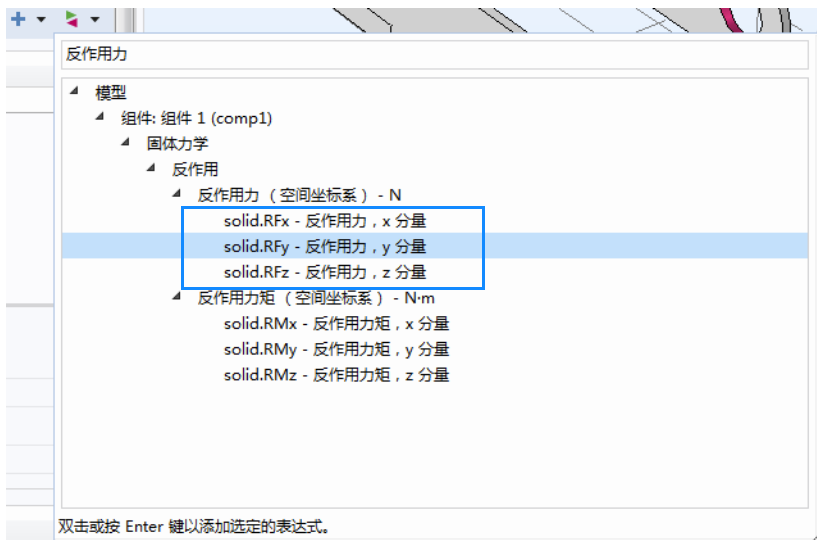


## 派生值

在进行最终检查时，需要计算沿 x、y 和 z 方向的总反作用力。对约束的边界使用表面积分。

### 表面积分 - 螺栓 1

- 1 在“结果”工具栏中单击“更多派生值”<sup>8.85  
6-13.2</sup>，并选择“积分 > 表面积分”。此外，也可以在“模型开发器”中右键单击“派生值”，并选择“积分 > 表面积分”。
- 2 在“表面积分”的“设置”窗口中，键入表面积分，螺栓 1。
- 3 定位到“选择”栏。从“选择”列表中，选择“螺栓 1”。
- 4 定位到“表达式”栏。单击“表达式”栏右上角的“替换表达式”。从菜单中选择“组件 1 > 固体力学 > 反作用 > 反作用力（空间坐标系） > solid.RFx - 反作用力，x 分量”。
- 5 以类似的方式，单击“添加表达式” 向表格的第二行和第三行添加 y 和 z 方向的反作用力。



6 单击“计算”按钮 。

“表格”下会添加一个“表格”节点，并在“表格”窗口（位于“图形”窗口下方）中记录计算结果。

| 消息 进度 日志 Table 1                                                                  |                |                |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------|
|  | 8.85<br>e-13   | 8.5<br>e-1     | 850<br>e-3 |
|  | 0.85           |                |            |
|                                                                                   |                |                |            |
| 反作用力, x 分量 (N)                                                                    | 反作用力, y 分量 (N) | 反作用力, z 分量 (N) |            |
| 451.35                                                                            | 306.52         | 2535.1         |            |

7 在“模型开发器”中展开“结果 > 表格”节点，然后单击“表格 1”。在“标签”文本框中键入反作用力，螺栓 1。

表面积分 - 螺栓 2、螺栓 3 和螺栓 4

重复在“表面积分 1”中完成的步骤，在“派生值”下添加四个“表面积分”节点 。单击“计算”以创建与每个“表面积分”节点关联的表格。

| 节点标签       | 选择   | 新表格节点名称    |
|------------|------|------------|
| 表面积分, 螺栓 2 | 螺栓 2 | 反作用力, 螺栓 2 |
| 表面积分, 螺栓 3 | 螺栓 3 | 反作用力, 螺栓 3 |
| 表面积分, 螺栓 4 | 螺栓 4 | 反作用力, 螺栓 4 |

在计算每个“螺栓”和重命名“表格”后，“模型开发器”节点序列应如下图所示。

|            |                                                                                     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 结果         |                                                                                     |
| 数据集        |                                                                                     |
| 视图         |                                                                                     |
| 派生值        |                                                                                     |
| 表面积分 1     |   |
| 表面积分 2     |  |
| 表面积分 3     |  |
| 表面积分 4     |  |
| 表格         |                                                                                     |
| 反作用力, 螺栓 1 |  |
| 反作用力, 螺栓 2 |  |
| 反作用力, 螺栓 3 |  |
| 反作用力, 螺栓 4 |  |
| 应力 (solid) |                                                                                     |
| 表面 1       |  |
| 变形         |  |
| 面上箭头 1     |  |
| 总位移        |                                                                                     |
| 表面 1       |  |
| 主应力        |                                                                                     |
| 体主应力 1     |  |



# 参数化研究

---

在上一节，我们分析了一个装载有执行器的支架。本节将对此分析进行扩展，研究执行器位置的影响，相当于改变外加载荷的方向。我们将使用载荷角参数来设置参数化研究。

COMSOL Multiphysics 提供两种方式来执行参数化研究 - “参数化扫描”节点或“稳态求解器”节点中的“辅助扫描”。在本例中，可以使用任一种方法。在此，我们使用“辅助扫描”，但不使用连续求解器。连续求解器将上一个参数的解作为初始猜测值来计算当前参数值，这是非线性问题的首选做法。“参数化扫描”节点适用于需要几何参数化之类的 App。

## 加载模型

---

可以继续从现有模型上操作，也可以从“案例库”中打开已保存的模型版本。浏览至 `Structural_Mechanics_Module\Tutorials` 文件夹。双击以打开 `bracket_static.mph`。

## 定义 - 参数和选择

---

- 1 在“模型开发器”中展开“全局定义”节点，然后单击“参数 1”  $P_1$ 。
- 2 在“参数”的“设置”窗口中，定位到“参数”栏。
- 3 在表格中添加以下设置：

| 名称     | 表达式    | 值     | 描述    |
|--------|--------|-------|-------|
| theta0 | 0[deg] | 0 rad | 载荷方向角 |

## 定义 - 局部坐标系

---

现在，我们将创建绕载荷方向旋转的局部坐标系。

柱坐标系 2 (sys2)

- 1 在“定义”工具栏中，单击“坐标系” 并选择“柱坐标系”。
- 2 在“柱坐标系”的“设置”窗口中，定位到“设置”栏。
- 3 找到“原点”子栏。在表中输入以下设置：

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| X (M) | Y (M) | Z (M) |
| 0     | YC    | 0     |

- 4 找到“纵轴”子栏。在表中输入以下设置：

|   |   |   |
|---|---|---|
| X | Y | Z |
| 1 | 0 | 0 |

- 5 找到“轴  $\varphi=0$  的方向”子栏。在表中输入以下设置：

|   |                       |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|
| X | Y                     | Z                     |
| 0 | $\sin(\text{theta0})$ | $\cos(\text{theta0})$ |

坐标系的方向此时取决于参数  $\text{theta0}$ 。

设置

柱坐标系

标签: 柱坐标系 2

名称: sys2

▼ 设置

坐标系:

空间 (x, y, z)

坐标名称

| 第一轴 | 第二轴 | 第三轴 |
|-----|-----|-----|
| r   | phi | a   |

原点

| x (m) | y (m) | z (m) |
|-------|-------|-------|
| 0     | YC    | 0     |

纵轴

| x | y | z |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 |

轴  $\varphi=0$  的方向

| x | y                     | z                     |
|---|-----------------------|-----------------------|
| 0 | $\sin(\text{theta0})$ | $\cos(\text{theta0})$ |

## 定义 - 函数

---

更改载荷分布的表达式。

### 解析 1 (load)

- 1 在“模型开发器”的“组件 1 (comp1) > 定义”下，单击“解析 1 (load)”。
- 2 在“解析”的“设置”窗口中，定位到“定义”栏。在“表达式”文本框中，将先前的表达式替换为  $F \cdot \cos(p)$ 。
- 3 在“变元”文本框中键入  $F, p$ 。
- 4 定位到“单位”栏。在“变元”文本框中，将先前的内容替换为  $\text{Pa}, \text{rad}$ 。

The screenshot shows the 'Definition' tab of the 'Settings' window for 'Parse 1 (load)'. The 'Function name' is 'load'. Under the 'Definition' section, the 'Expression' is  $F \cdot \cos(p)$ , the 'Variables' are  $F, p$ , and the 'Derivative' is set to 'Automatic'. Below this is the 'Periodic extension' section. The 'Unit' section shows 'Variables' as  $\text{Pa}, \text{rad}$  and 'Function' as  $\text{Pa}$ . The 'Advanced' section is collapsed.

## 固体力学

---

更改边界载荷以考虑参数化方向。

### 边界载荷 1

- 1 在“模型开发器”中展开“组件 1 (comp1) > 固体力学 (solid)”节点，然后单击“边界载荷 1”。
- 2 定位到“坐标系选择”栏。从“坐标系”列表中，选择“柱坐标系 2 (sys2)”。

3 定位到 “力” 栏。将  $\mathbf{F}_A$  矢量指定为

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| <code>load(-P0,sys2.phi)*(abs(sys2.phi)&gt;pi/2)</code> | r   |
| 0                                                       | phi |
| 0                                                       | a   |

请注意使用布尔表达式 `abs(sys2.phi)>pi/2` 过滤载荷的方式，使其仅施加于半个螺栓孔。不过，载荷作用区域会绕坐标系旋转，这由参数 `theta0` 控制。

边界载荷 2

- 1 在 “模型开发器” 窗口中，单击 “边界载荷 2”。
- 2 定位到 “坐标系选择” 栏。从 “坐标系” 列表中，选择 “柱坐标系 2 (sys2)”。
- 3 定位到 “力” 栏。将  $\mathbf{F}_A$  矢量指定为

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| <code>load(P0,sys2.phi)*(abs(sys2.phi)&lt;pi/2)</code> | r   |
| 0                                                      | phi |
| 0                                                      | a   |

接下来，添加辅助扫描参数。

研究 - 辅助扫描

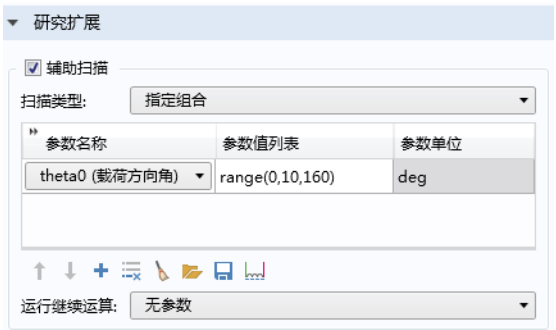
参数化研究既可以从头开始设置，也可以添加到现有研究中（如本例）。此模型计算支架在承受不同方向的载荷时的应力。首先选择扫描参数，本例中为载荷方向角。然后运行分析。

步骤 1：稳态

- 1 在 “模型开发器” 中展开 “研究 1” 节点，并单击 “步骤 1：稳态” .
- 2 在 “稳态” 的 “设置” 窗口中，单击以展开 “研究扩展” 栏。选中 “辅助扫描” 复选框。
- 3 在表格下单击 “添加” .
- 4 从列表中选择 `theta0` (Load direction angle)。在表格中输入其他设置:

| 参数名称   | 参数值列表                        | 参数单位 |
|--------|------------------------------|------|
| theta0 | <code>range(0,10,160)</code> | deg  |

5 由于您要分析一组独立载荷，可以从“运行继续运算”列表中选择“无参数”。



6 在“稳态”的“设置”窗口中，单击“计算”。

## 结果

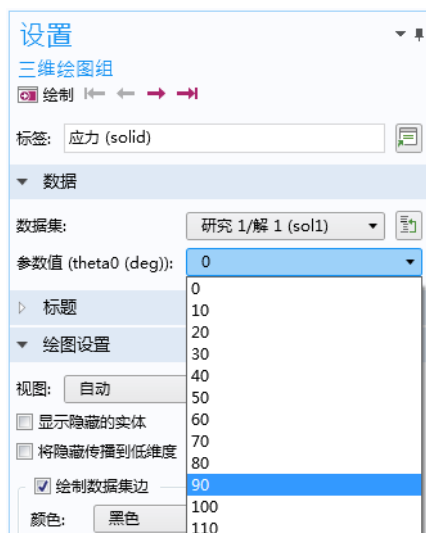
默认绘图显示最后一个参数值 (160[deg]) 的解。您可以轻松更改参数值来显示绘图，然后比较不同载荷工况下的解。

**注：**单击“缩放到窗口大小”按钮 ，查看新的默认绘图。

### 应力 (solid)

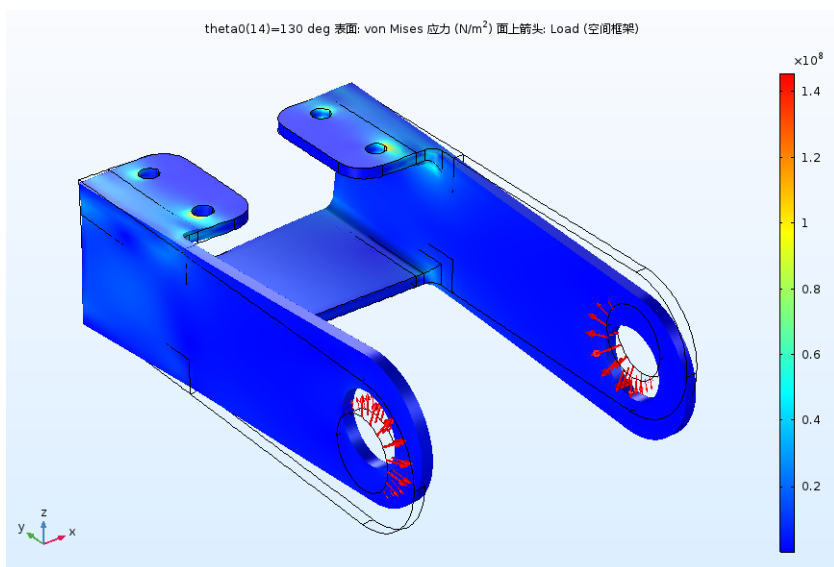
1 在“三维绘图组”的“设置”窗口中，单击“绘制第一个”按钮  以绘制载荷角度为 0 的第一个解。

- 2 定位到“数据”栏。从“参数值 (theta0 (deg))”列表中选择 90。单击“绘制”。



- 3 重复此操作并选择 130。单击“绘制”。

角度为 130 时的应力分布如下所示。



现在，我们创建一个绘图，显示反作用力随载荷角度的变化情况。

### 派生值

- 1 在“模型开发器”的“结果”节点下，右键单击“表格”并选择“全部清除”。
- 2 在“结果”工具栏中，单击“全部计算”。
- 3 在“结果”工具栏中，单击“一维绘图组”。

### 一维绘图组 4

- 1 在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入反作用力， $x$  分量。
- 2 在“反作用力， $x$  分量”工具栏中，单击“表图”。

表图 1

- 1 在“表图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 2 从“绘制列”列表中，选择“手动”。
- 3 在“列”列表中，选择“反作用力，x 分量 (N)”。
- 4 定位到“着色和样式”栏。在“宽度”文本框中键入 3。
- 5 并找到“线标记”子栏。从“标记”列表中，选择“星号”。
- 6 单击展开“图例”栏。选中“显示图例”复选框。
- 7 从“图例”列表中选择“手动”。
- 8 在“图例”表中输入螺栓 1。

表图 2

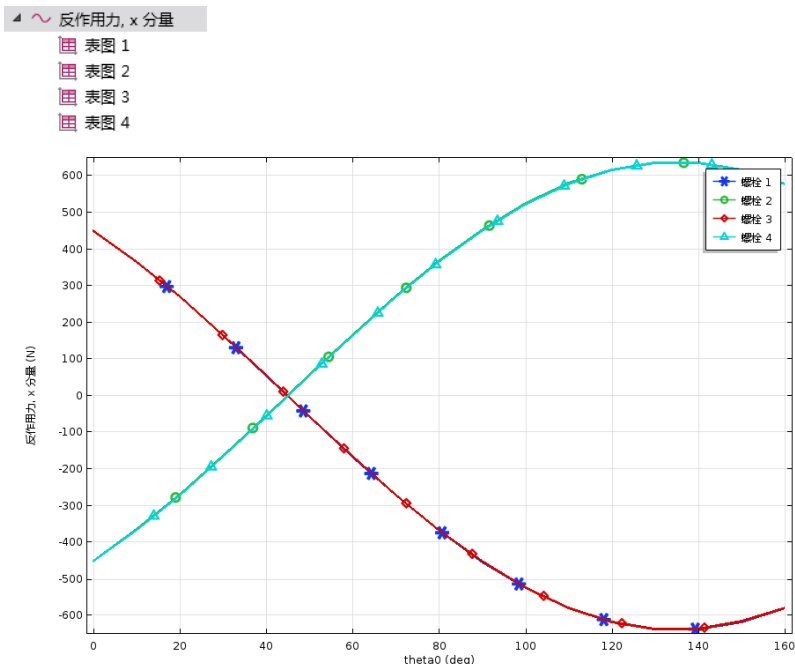
- 1 右键单击“表图 1”并选择“生成副本”。
- 2 在新“表图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“表格”列表中选择“反作用力，螺栓 2”。
- 4 定位到“着色和样式”栏。并找到“线标记”子栏。从“标记”列表中，选择“圆”。
- 5 在“数量”文本框中键入 7。
- 6 定位到“图例”栏。在表格中，将螺栓 1 替换为螺栓 2。
- 7 重复上述步骤 1 到 6，以添加另外两个图，其属性如下：



| 表格        | 标记样式 | 标记数量 | 图例   |
|-----------|------|------|------|
| 反作用力，螺栓 3 | 菱形   | 9    | 螺栓 3 |
| 反作用力，螺栓 4 | 三角形  | 10   | 螺栓 4 |



- 8 在“反作用力，x 分量”工具栏中，单击“绘制”。“模型开发器”中的节点序列和“图形”窗口中的绘图此时应与下图相符：



- 9 在“模型开发器”窗口中，右键单击“反作用力，x 分量”并选择“生成副本”。

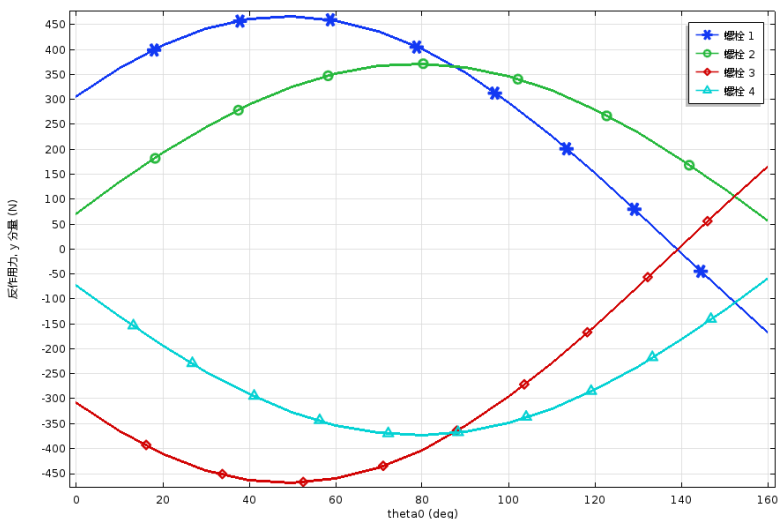
### 反作用力，x 分量 1

在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入“反作用力，y 分量”。

### 反作用力，y 分量

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“结果>反作用力，y 分量”节点，然后单击“表图 1”。
- 2 在“表图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 在“列”列表中，选择“反作用力，y 分量(N)”。
- 4 对接下来的三个表图做相应的更改。

5 在“反作用力，y 分量”工具栏中，单击“绘制”。



6 在“模型开发器”窗口中，右键单击“反作用力，y 分量”并选择“生成副本”。

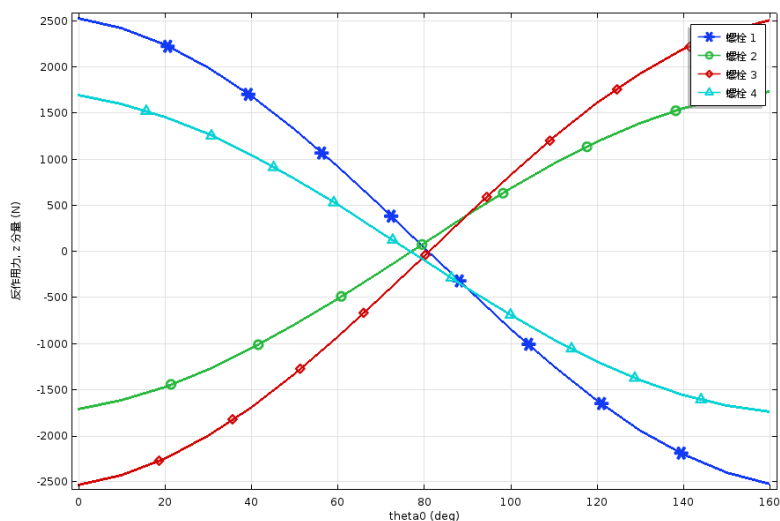
### 反作用力，y 分量 1

在“一维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入“反作用力，z 分量”。

### 反作用力，z 分量

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“结果 > 反作用力，z 分量”节点，然后单击“表图 1”。
- 2 在“表图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 在“列”列表中，选择“反作用力，z 分量 (N)”。
- 4 对接下来的三个表图做相应的更改。

5 在“反作用力，z分量”工具栏中，单击“绘制”。



## 结构力学建模技巧

后续教程以前面的示例为基础，演示以下结构力学建模技巧：如何执行热应力建模？如何为仿真添加预应变？要开始操作，请参见[包含预应变或热膨胀建模](#)。

# 包含预应变

您可以在材料模型的子节点中指定预应力和预应变，并可以使用常数值来定义应力 / 应变分布，也可以将其定义为与空间或时间等因素相关的表达式。预应力和预应变也可以从同一研究中的其他物理场接口调用，甚至取自其他研究的结果。

在本例中，我们为支架装配添加销几何。然后，指定预应变来模拟在轴向过短的销，随后研究其对装配产生的影响。

## 定义 - 参数

用于定义销的原始长度  $L_0$  和当前长度  $L$  的参数可用于计算预应变。预应变是作用在结构上的唯一载荷，该结构固定在螺栓孔上。

### 参数

- 1 浏览至 `Structural_Mechanics_Module\Tutorials` 文件夹，并双击打开 `bracket_basic.mph`。
- 2 在“主屏幕”工具栏中单击“参数”  $P_i$  并选择“参数 1”  $P_i$ 。
- 在“参数”表中，定义一个应变值，用于描述销长度从 215 mm 减小到 214 mm。
- 3 在“参数”的“设置”窗口中，定位到“参数”栏。
- 4 在表中输入以下设置：

| 名称         | 表达式           | 值          | 描述    |
|------------|---------------|------------|-------|
| L0         | 215[mm]       | 0.21500 m  | 初始销长度 |
| L          | 214[mm]       | 0.21300 m  | 当前销长度 |
| InitStrain | $(L-L_0)/L_0$ | -0.0046512 | 销应变   |

现在，表格应如下所示：

| 设置         |           |            |      |
|------------|-----------|------------|------|
| 参数         |           |            |      |
| ▼ 参数       |           |            |      |
| 名称         | 表达式       | 值          | 描述   |
| L0         | 215[mm]   | 0.215 m    | 初始销长 |
| L          | 214[mm]   | 0.214 m    | 当前销长 |
| InitStrain | (L-L0)/L0 | -0.0046512 | 销应变  |
|            |           |            |      |

## 几何

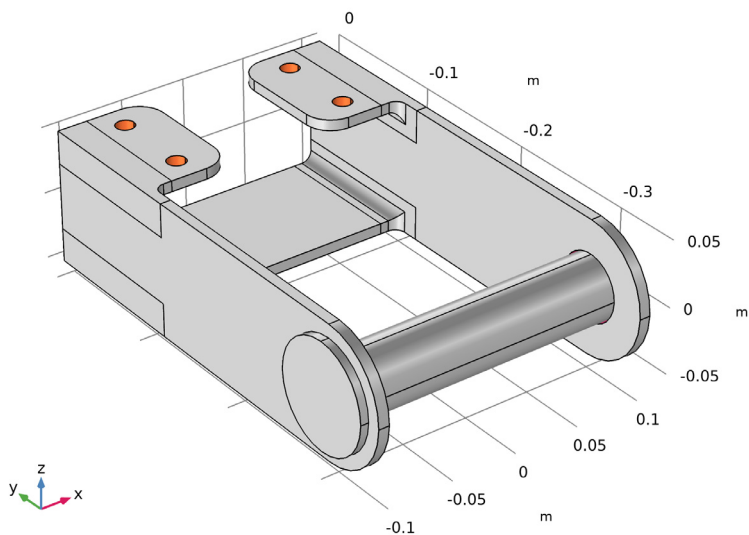
接下来，将销几何添加到支架装配，直接将销几何导入现有几何即可。

**注：**本练习中所用文件的位置根据安装目录的不同而有所变化。例如，如果安装在硬盘上，文件路径应类似于 `C:\Program\COMSOL54\Multiphysics\applications\Structural_Mechanics_Module\Tutorials`。

### 导入

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“导入”。“导入 2”节点会添加到“模型开发器”中。
- 2 在“导入”的“设置”窗口中，定位到“导入”栏。从“源”列表中选择“COMSOL Multiphysics 文件”。
- 3 单击“浏览”并找到模型文件夹 `Structural_Mechanics_Module\Tutorials`，然后双击文件 `bracket_pin.mphbin`。

**4** 单击“导入”。



形成联合体 (fin)

- 1 在“模型开发器”的“几何1”节点下，单击“形成联合体(fin)”。
- 2 在“形成联合体/装配”的“设置”窗口中，定位到“形成联合体/装配”栏。
- 3 从“动作”列表中选择“形成装配”。
- 4 单击“构建选定对象”按钮。

## 固体力学 (solid)

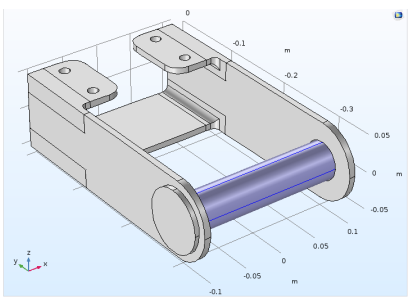
线弹性材料 1: 添加预应力和预应变  
预应变在“线弹性材料”节点下指定。

- 1 在“模型开发器”中展开“固体力学”，然后单击“线弹性材料 1”。在“物理场”工具栏中单击“属性”，并选择“预应力和预应变”。“线弹性材料”节点左上角的‘D’表明这是默认节点。



- 2 在“预应力和预应变”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。从“选择”列表中选择“手动”。
- 3 在“选择”列表右侧，单击“清除选择”按钮。然后仅选择“域”2（销）。

预应变方向为螺栓的轴向，与全局  $x$  方向一致。



- 4 在“预应力和预应变”栏中，在  $\epsilon_0$  表的第一个分量中输入 `InitStrain`。

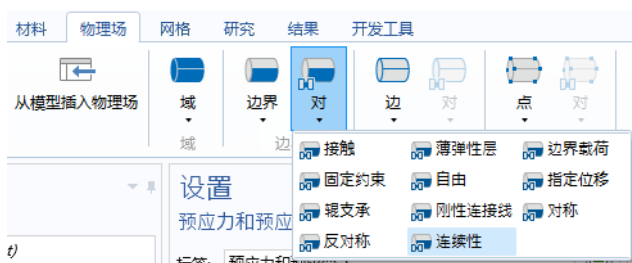


### 连续性 1：连接零件

您之前已在几何序列中选择“形成装配”，尽管销和支架的某些边界发生接触，但它们仍是单独的对象。要连接这两个对象，可以使用接触条件或连续性条件。由于销是压紧支架的，边界始终处于接触状态，因此使用连续性条件就足够了。

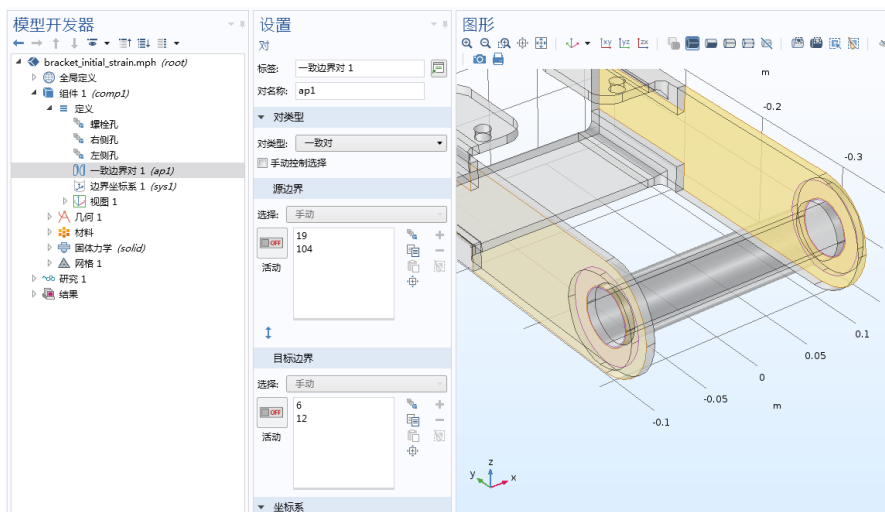
本例使用装配的优势在于支架上的网格与销头不必匹配。

1 在“物理场”工具栏中，单击“对”并选择“连续性”。



2 在“连续性”的“设置”窗口中，定位到“对选择”栏。在“对”列表中选择“一致边界对 1”。

对是通过在构建几何时检测相邻边界来自动创建的。您可以在“模型开发器”窗口的“定义”分支下检查其定义，并根据需要进行修改。

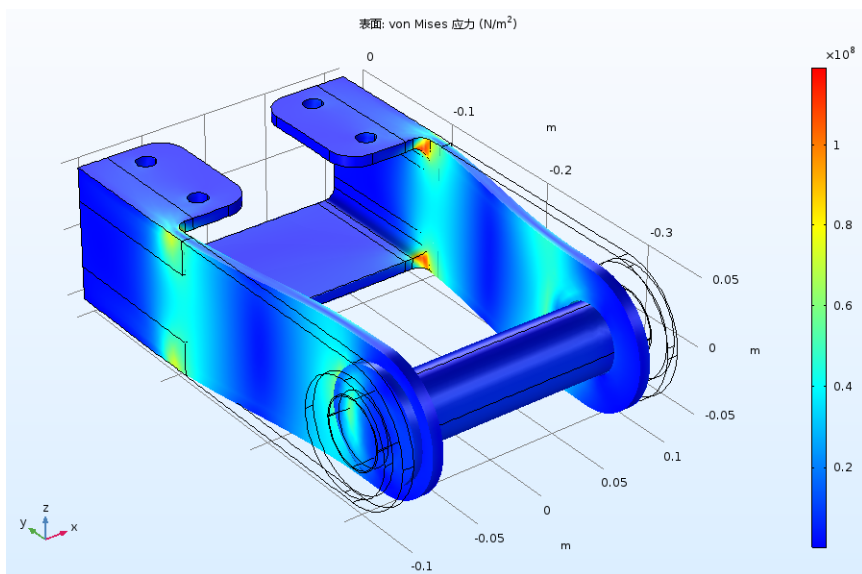




## 添加研究并计算

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加研究”以打开相应的窗口。转到“添加研究”窗口。
- 2 找到“研究”子栏。在“选择研究”树的“一般研究”分支下，单击“稳态”.
- 3 在“添加研究”窗口中，单击“添加研究”.
- 4 在“主屏幕”工具栏中，再次单击“添加研究”以关闭该窗口。
- 5 在“主屏幕”工具栏中单击“计算”.

默认绘图显示支架中的 von Mises 应力。



结果显示销如何压紧支架臂，并且最大应力位于支架臂与螺栓支撑的连接区域。

## 结果

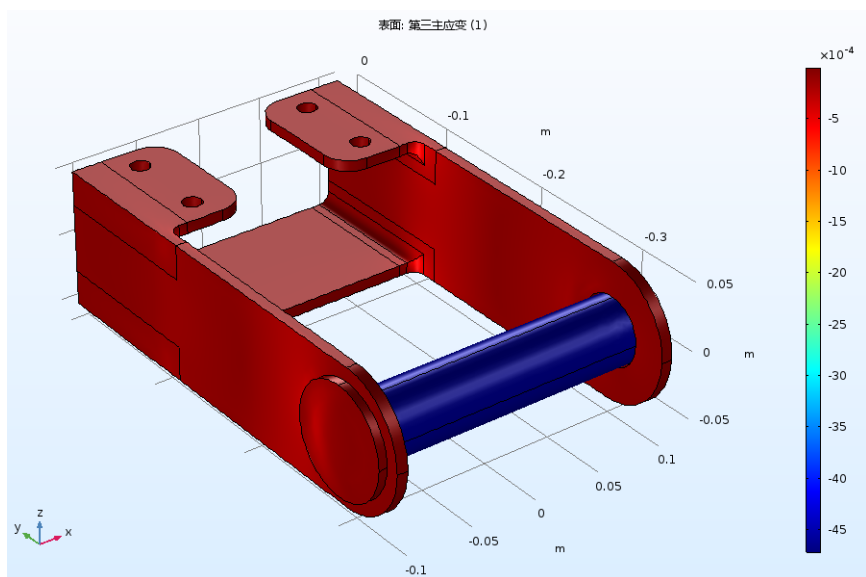
您也可以绘制主应变，将结构中产生的应变可视化。由于销比支架的硬度更大，因此，销中的总应变几乎与输入给出的预应变相同。

## 三维绘图组 2

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加绘图组” 并选择“三维绘图组”.
- 2 在“三维绘图组”“设置”窗口的“标签”文本框中，键入第三主应变（替换默认值）。

## 第三主应变

- 1 在“第三主应变”工具栏中，单击“表面”（或右键单击“第三主应变”节点并选择“表面”）。
- 2 在“表面”的“设置”窗口中，单击“表达式”栏右上角的“替换表达式”。从菜单中选择“组件 1 > 固体力学 > 应变 > 主应变 > solid.ep3 - 第三主应变”。
- 3 在工具栏或“设置”窗口中，单击“绘制”.



## 热膨胀建模

---

在本例中，我们为支架和销装配施加温度场，然后计算热应力。

COMSOL Multiphysics 包含结构分析和热分析的物理场接口。您可以单独定义这些分析，然后使用结构分析方程中适当的变量和项来耦合它们，从而模拟热-结构相互作用，也可以在设置开始时添加预定义的“热应力”接口。

如果使用“固体力学”接口，则可以为材料模型添加热膨胀，这与添加预应变一样简单-可以为“线弹性材料模型”添加“热膨胀”节点。

不过，更简单的做法是使用预定义的物理场接口，即“热应力”接口。此物理场接口包含结构和热方程，且默认情况下还包含耦合。

### 选择物理场、选择研究和加载几何

---

- 1 单击“模型向导”按钮。

如果 COMSOL 已打开，要启动“模型向导”，可以从“文件”菜单中选择“新建”，然后单击“模型向导”.

- 2 在“选择空间维度”页面单击“三维”.

- 3 在“选择物理场”树的“结构力学”下，单击“热应力”.

- 4 单击“添加”，然后单击“研究”.

- 5 在“选择研究”树的“一般研究”分支下，单击“稳态”.

- 6 单击“完成”.

- 7 在“主屏幕”工具栏中单击“导入”.

- 8 在“导入”的“设置”窗口中，定位到“导入”栏。

- 9 从“源”列表中选择“COMSOL Multiphysics 文件”。

- 10 单击“浏览”。

- 11 浏览至 COMSOL 安装目录下的文件夹 Structural\_Mechanics\_Module\Tutorials，并双击文件 bracket.mphbin。

- 12 单击“导入”。

## 形成联合体 (fin)

- 1 在“模型开发器”的“组件 1 (comp1)>几何 1”下，单击“形成联合体 (fin)”。在“设置”窗口中，单击“构建选定对象”（或右键单击并选择同一选项）。

## 热应力

在添加“热应力”多物理场接口时，会将一个“固体力学”接口、一个“固体传热”接口以及一个“多物理场”节点添加到“模型开发器”。

在“多物理场”节点下有两个子节点：“温度耦合”与“热膨胀”。单击这些节点时可以看到，在添加多物理场接口后，会自动建立耦合。





**注：**热膨胀需要热膨胀系数 (CTE) 和体积参考温度（即无热应变时的温度）。

默认情况下，体积参考温度从“通用模型输入”中获取，原因在于该物理量常常被不同的物理场接口共享。要查看或修改该物理量的值，可单击“切换到源”按钮 。系统将跳转到“模型开发器”的“全局定义”下的“通用模型输入”节点。默认值为室温，即 293.15 K。

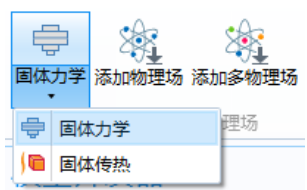
# 材料

添加材料，其中包含结构和热属性。

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“添加材料”。
- 2 在“添加材料”窗口的“内置材料”下，单击 Structural steel。单击“添加到组件”。
- 3 在“主屏幕”工具栏中，再次单击“添加材料”以关闭该窗口。

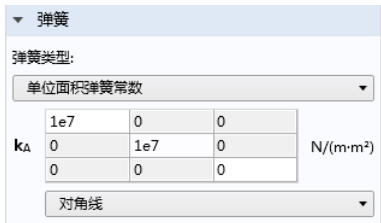
现在设置边界条件。

- 1 请确保“固体力学”接口当前处于活动状态。为此，可以从“物理场”工具栏的列表中选择该物理场接口，也可以在“模型开发器”中单击“固体力学”下的节点。
- 2 在“物理场”工具栏中，单击“边界”并选择“辊支承”。
- 3 在“辊支承”的“设置”窗口中，选择“边界”17 和 27。



在此分析中，螺栓孔上的固定约束由弹簧代替，以避免热膨胀引起较大的局部应力。

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“边界”并选择“弹簧基础”。
- 2 在“弹簧基础”的“设置”窗口中，选择“边界”18-21 和 31-34。
- 3 定位到“弹簧”栏。从文本框下方的列表中选择“对角线”。文本框会变为矩阵输入。



- 4 如图所示，在  $k_A$  矩阵的前两个对角元素中输入  $1e7$ 。即可在全局 X 和 Y 方向提供一个刚度。

由于“固体传热”接口包含热平衡，因此还必须设置热边界条件。热通量在螺栓孔下方的两条边界上指定。其他所有边界都假设被具有室温的空气环绕，可通过对流条件进行建模。

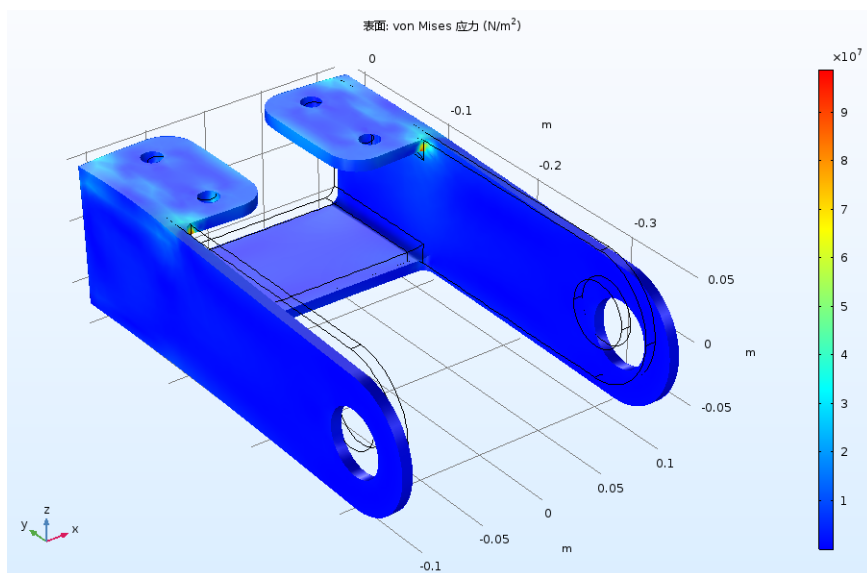
- 1 在“物理场”工具栏中，确保“固体传热”物理场接口当前处于活动状态（或单击“模型开发器”中的“固体传热”节点）。
- 2 在“物理场”工具栏中，单击“边界”并选择“热通量”。
- 3 在“热通量”的“设置”窗口中，从“选择”列表中选择“所有边界”。然后从选择中移除边界 17 和 27。
- 4 在“热通量”栏中，单击“对流热通量”按钮。在 h 文本框中输入 10。

- 5 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“热通量”。
- 6 在“热通量”的“设置”窗口中，选择边界 17 和 27。
- 7 在“热通量”栏的  $q_0$  文本框中，输入  $1e4$ 。

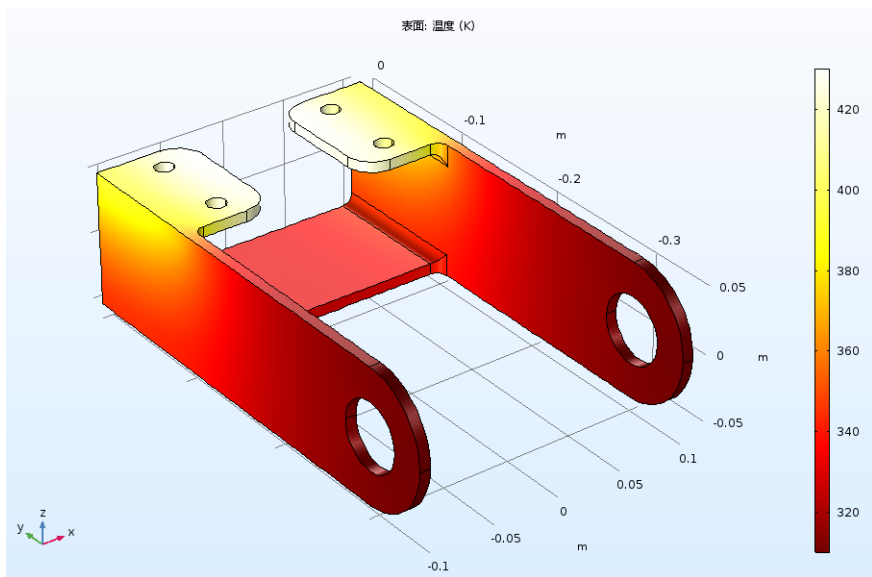
## 计算并显示结果

在“研究”工具栏中单击“计算”。

在“结果”节点下，会自动添加三个绘图组，以显示结构分析和热分析的默认结果。第一个绘图组“应力 (solid)”，显示已缩放的变形几何上的 von Mises 应力。由于边界条件和非均匀的温度分布，在结构上产生了热应力。



第二个默认绘图组“温度 (ht)”显示温度分布。指定了向内热通量的位置的温度最高，随着热量与其他所有边界发生对流而逐渐消散，温度逐渐降低。



最后一步，选取一个绘图用作模型缩略图。

- 1 在“模型开发器”的“结果”节点下，单击任意绘图组。
- 2 单击根节点（模型树中的第一个节点）。在“根节点”“设置”窗口的“缩略图”下，单击“从‘图形’窗口设置”。

在“图形”窗口中使用工具栏按钮来调整图像，直到满意为止。

## 案例库中的示例

简介到本例结束。

在“结构力学模块”案例库中，有多个更详细的示例使用支架几何对本教程进行了扩展。这些示例演示如何：

- 使用特殊特征进行建模，如刚性连接件和弹簧条件 (bracket\_rigid\_connector, bracket\_spring)
- 结合使用“壳”接口与“固体力学”接口对薄结构进行建模 (bracket\_shell)
- 使用特征频率提取、瞬态分析和频率响应分析来执行结构动力学分析 (bracket\_eigenfrequency, bracket\_transient, bracket\_frequency)
- 执行线性屈曲分析 (bracket\_linear\_buckling)
- 执行接触分析 (bracket\_contact)