



COMSOL Multiphysics

简介

COMSOL Multiphysics 简介

© 1998–2018 COMSOL 版权所有

受列于 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) 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联，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。

版本：COMSOL 5.3a

联系信息

请访问“联系我们”页面 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，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，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
- 产品下载：cn.comsol.com/product-download
- 产品更新：cn.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客：cn.comsol.com/blogs
- 用户论坛：cn.comsol.com/community
- 活动：cn.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心：cn.comsol.com/video
- 技术支持知识库：cn.comsol.com/support/knowledgebase

文档编号：CM010004

目录

简介.....	5
COMSOL Desktop®.....	6
示例 1：扳手结构分析.....	31
模型向导.....	31
几何.....	33
材料.....	36
全局定义.....	37
物理场和边界条件.....	39
网格.....	42
研究.....	43
结果.....	44
收敛性分析.....	47
示例 2：母线板 - 多物理场模型.....	54
模型向导.....	56
全局定义.....	59
自动完成与查找参数和变量.....	60
几何.....	62
材料.....	65
物理场和边界条件.....	70
网格.....	77
研究.....	79
结果.....	79

开发 App.....	87
高级主题	98
参数、函数、变量和耦合	98
材料属性和材料库.....	102
添加网格.....	104
添加物理场.....	106
参数化扫描.....	128
并行计算.....	140
COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器	143
附录 A - 构建几何.....	146
附录 B - 键盘和鼠标快捷方式.....	162
附录 C - 语言元素和保留名称.....	166
附录 D - 文件格式.....	180
附录 E - 使用 LiveLink™ 附加产品连接	187

简介

首次使用 COMSOL Multiphysics® 软件之前，请仔细阅读本书。其中提供了 COMSOL® 环境的概述，并附带多个示例来演示如何使用 COMSOL Desktop® 用户界面和“模型开发器”。此外，还简要介绍了如何使用“App 开发器”来创建 App。

如果您尚未安装软件，现在请按照操作说明进行安装，下载地址：cn.comsol.com/product-download。

除本书外，您还可以在软件安装完成后获取丰富的产品文档。COMSOL 网站提供了许多教程，您可以在“视频中心”（网址为 cn.comsol.com/videos）和“COMSOL 博客”（网址为 cn.comsol.com/blogs）页面获取相关资源。

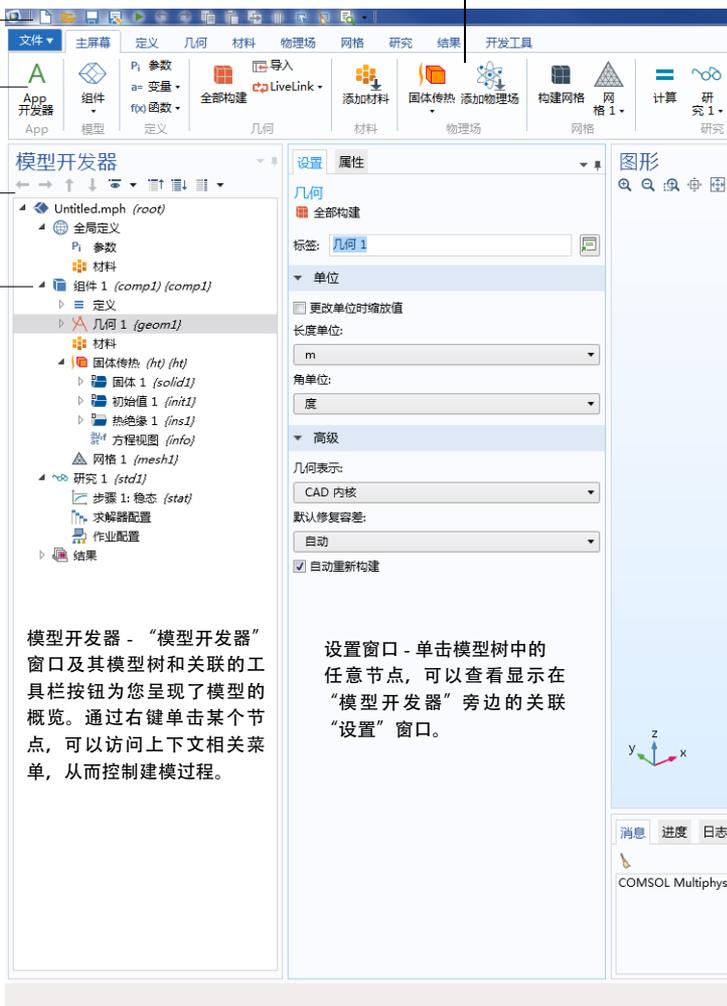
快速访问工具栏 - 使用这些按钮可以访问各种功能，例如文件打开 / 保存、撤消 / 重做、复制 / 粘贴以及删除。

功能区 - 功能区中各个选项卡包含的按钮和下拉列表可用于控制建模过程中的所有步骤。

App 开发器 - 单击此按钮可以切换到“App 开发器”，并开始基于模型开发 App。

模型开发者工具栏

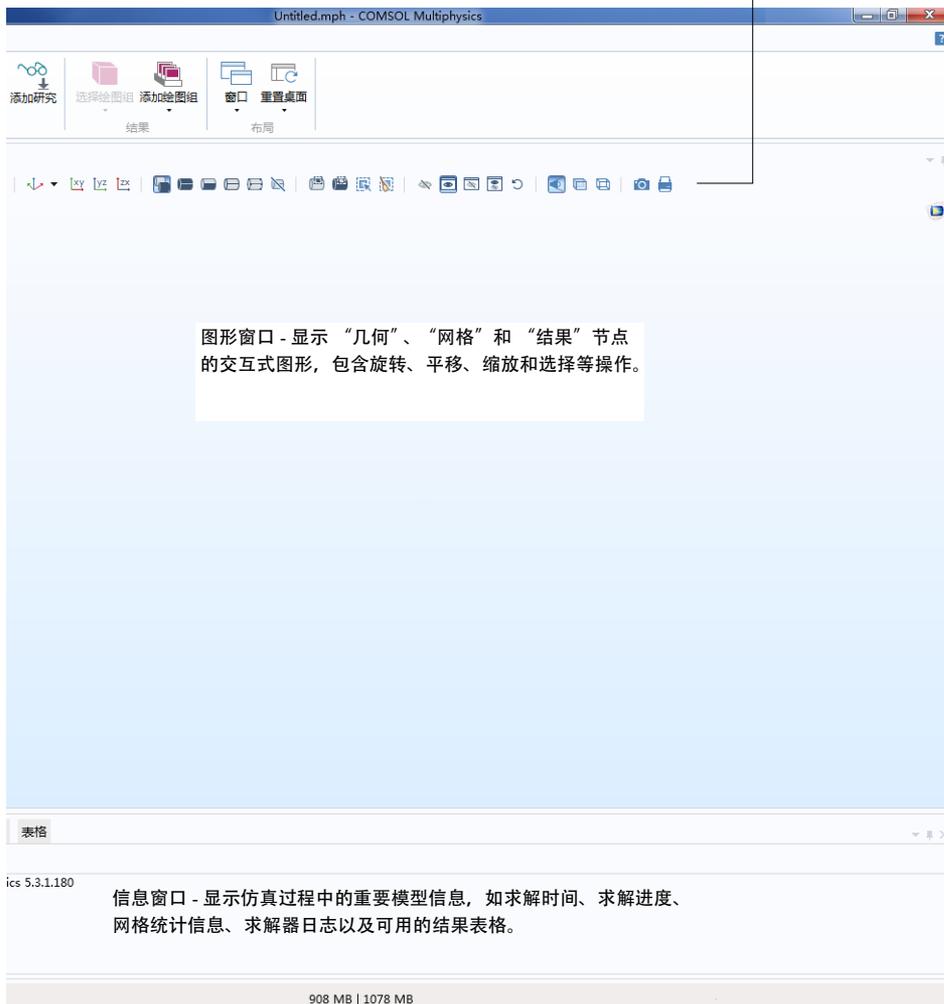
模型树 - 提供模型的概览，并包含构建和求解模型以及处理结果所需的所有功能和操作。



模型开发者 - “模型开发者”窗口及其模型树和关联的工具栏按钮为您呈现了模型的概览。通过右键单击某个节点，可以访问上下文相关菜单，从而控制建模过程。

设置窗口 - 单击模型树中的任意节点，可以查看显示在“模型开发者”旁边的关联“设置”窗口。

图形窗口工具栏



图形窗口 - 显示“几何”、“网格”和“结果”节点的交互式图形，包含旋转、平移、缩放和选择等操作。

信息窗口 - 显示仿真过程中的重要模型信息，如求解时间、求解进度、网格统计信息、求解器日志以及可用的结果表格。

当您首次使用 COMSOL Multiphysics 中的“模型开发器”开始建模时，会看到如上页屏幕截图所示的图形用户界面。COMSOL Desktop[®] 用户界面为物理场建模和仿真以及 App 设计提供完整的集成环境，当您需要为模型构建友好的用户界面时，便可在访问所需的各种工具。您可以根据需要定制桌面。还可以对窗口进行调整大小、移动、停靠及分离等操作。关闭会话时，COMSOL Multiphysics 会自动保存您对布局所做的任何更改，您下次打开软件时，这些更改仍然有效。在构建模型的过程中，软件会根据您的具体操作显示相应的附加窗口和控件。（请参见第 24 页以获取更完善的桌面示例。）可用的窗口和用户界面组件如下：

快速访问工具栏

“快速访问工具栏”可供您访问各种功能，例如**打开、保存、撤消、重做、复制、粘贴**以及**删除**。可以从**定制快速访问工具栏列表**（工具栏右侧的向下箭头）中定制其内容。

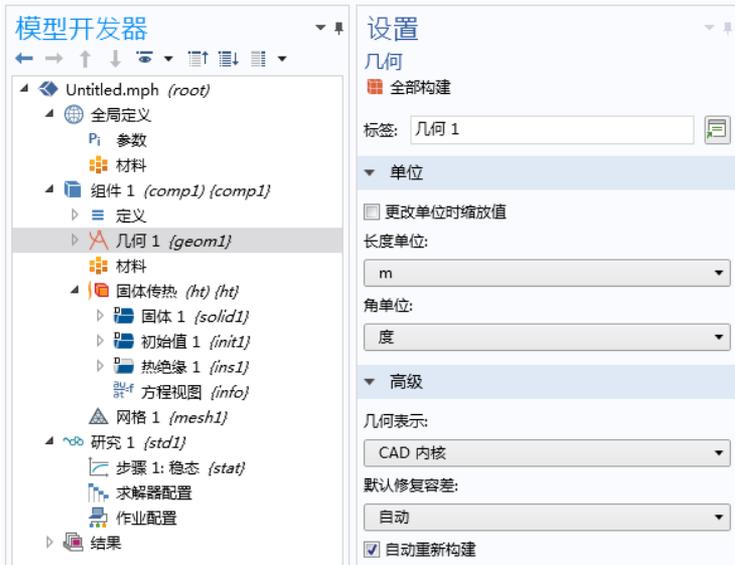
功能区

桌面顶部的功能区可供您访问用于完成大多数建模任务的命令。功能区仅在 Windows[®] 版本的 COMSOL Desktop 环境中可用，在 OS X 和 Linux[®] 版本中，则由菜单和工具栏代替。单击 **App 开发器** 按钮可从“模型开发器”切换至“App 开发器”，并开始基于模型构建 App。

设置窗口

这是用于输入所有模型明细信息的主窗口，包括几何尺寸、材料属性、边界条件、初始条件以及执行仿真时求解器所需的任何其他信息。

下图显示几何节点的设置窗口。



绘图窗口

这些窗口用于图形输出。除图形窗口外，绘图窗口也用于对结果进行可视化。可以使用多个绘图窗口同时显示多个结果。收敛图窗口是一个特例，它是自动生成的绘图窗口，显示模型运行时求解过程收敛的图形表示。

信息窗口

这些窗口用于显示非图形信息。包括：

- **消息：**此窗口显示有关当前 COMSOL Multiphysics 会话的各种信息。
- **进度：**显示求解器中的进度信息和停止按钮。
- **日志：**显示求解器中的信息，例如自由度数、求解时间以及求解器迭代数据。
- **表格：**以表格形式显示结果节点中定义的数值数据。
- **外部进程：**提供用于集群、云计算和批处理作业的控制面板。

其他窗口

- **添加材料和材料浏览器：** 访问材料属性库。材料浏览器可用于编辑材料属性。
- **选择列表：** 显示当前可供选择的几何对象、域、边界、边和点的列表。

功能区主屏幕选项卡中的窗口下拉列表可供您访问所有 COMSOL Desktop 窗口。（对于 OS X 和 Linux[®] 系统，则位于窗口菜单中。）

带取消按钮的进度条

进度条位于 COMSOL Desktop 界面的右下角，包含用于取消当前计算（如果有）的按钮。

动态帮助

帮助窗口提供有关窗口与模型树节点的上下文相关帮助文本。如果已在 Desktop 中打开帮助窗口（例如按 F1 键），则在单击某个节点或窗口时，会自动获取动态帮助。您可以从帮助窗口搜索其他主题，如菜单项。

模型开发器和 App 开发器

COMSOL Desktop 环境的两个主要组成部分是“模型开发器”和“App 开发器”。

“模型开发器”是定义模型及其组件的工具，例如求解方式、结果分析以及创建报告。可以通过构建模型树来实现这些操作。模型树反映了底层数据结构（即模型对象），其中存储的模型状态包含以下设置：几何、网格、物理场、边界条件、研究、求解器、后处理以及可视化。

“App 开发器”可供您通过易于使用的专业用户界面，基于在“模型开发器”中创建的模型快速创建 App。其中提供两个重要的 App 创建工具：“表单编辑器”和“方法编辑器”。此外，App 还可以包含菜单栏或功能区。“表单编辑器”包含的拖放功能可用于轻松访问用户界面组件并将其加入 App，例如输入框、图形窗口及按钮。“方法编辑器”是一个编程环境，可供您修改以模型对象数据结构表示的模型等。您还可以使用“方法编辑器”将用户界面逻辑和辅助功能添

加到 App。“方法编辑器”支持使用 Java[®] 编程语言来编写代码，也就是说，您可以使用所有 Java[®] 语法和 Java[®] 库。

“方法编辑器”中的程序代码存储在方法中。“方法”是其他编程语言中所谓的子例程、函数或过程等名称的另一种说法。有两种方法类型：App 方法和模型方法。这两种方法均可用于修改“模型开发器”中的模型对象数据结构。模型方法用于修改当前会话的模型对象，而 App 方法则用于执行各种不同的任务，包括修改正在运行的 App 中的模型对象。

本书《COMSOL Multiphysics 简介》详细介绍了“模型开发器”的使用，并简要介绍了“App 开发器”。有关如何使用“App 开发器”（包括“表单编辑器”和“方法编辑器”）的详细信息，请参阅《App 开发器简介》。

运行 App 和 COMSOL Server

“App 开发器”在 Windows[®] 版本的 COMSOL Multiphysics 中提供。如果您拥有 COMSOL Multiphysics 许可证，则可在 COMSOL Desktop 环境中运行 App。尽管 App 无法通过 macOS 或 Linux[®] 版本的软件进行开发，但 App 仍可通过这些平台上的 COMSOL Multiphysics 来运行。

如果拥有 COMSOL Server 许可证，便可在各种操作系统和硬件平台的主流 Web 浏览器中运行 App。此外，还可通过易于安装的 Windows[®] 版 COMSOL Client 连接到 COMSOL Server 来运行 App。

Windows[®] 版 COMSOL Client 还支持用户运行需要 CAD LiveLink™ 产品的 App（此功能在通过 Web 浏览器运行 App 时不可用）。

在 Web 浏览器中运行 App 时无需进行任何安装，也不需要任何 Web 浏览器插件。在 Web 浏览器中运行 App 时支持一维、二维及三维交互式图形。其中，三维图形渲染基于所有主流 Web 浏览器都采用的 WebGL™ 技术。

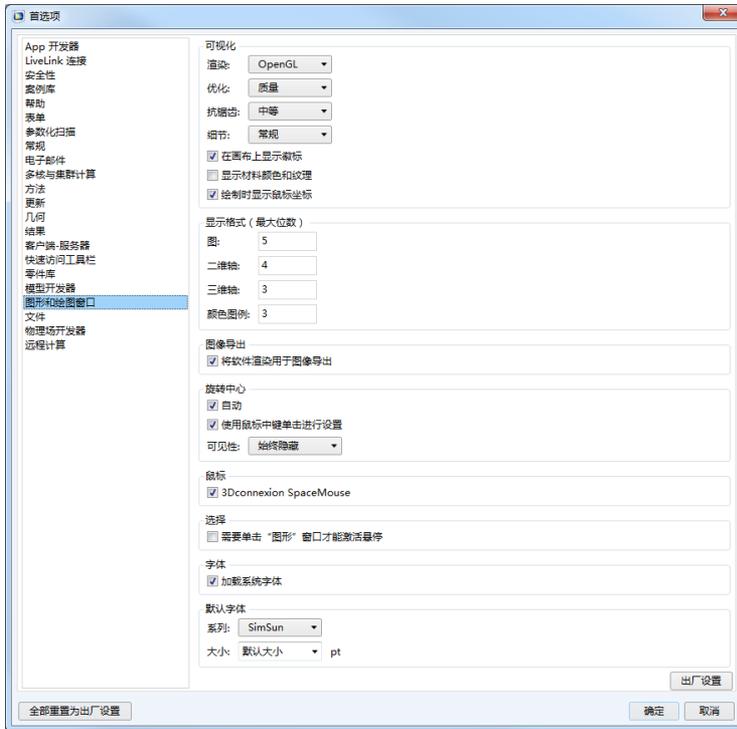
要基于模型创建 App，可以单击功能区主屏幕选项卡中的 **App 开发器** 按钮。

有关创建 COMSOL App 的更多信息，请参阅第 87 页的“开发 App”章节和《App 开发器简介》一书。



首选项

“首选项”是控制建模环境的设置。大部分设置在建模会话之间保持一致，但有些则随模型一起保存。可以通过从 **文件** 菜单选择 **首选项** 来访问首选项。



在 **首选项** 窗口中，可以更改各种设置，例如图形渲染、结果的显示位数、用于计算的最大 CPU 内核数或用户定义案例库的路径。请花一些时间浏览当前设置，以快速熟悉各种不同的选项。

有三个图形渲染选项可供使用：**OpenGL[®]**、**DirectX[®]** 及**软件渲染**。**DirectX[®]** 选项在 macOS 或 Linux[®] 中不可用，但在 Windows[®] 系统中，如果您在安装过程中选择了安装 DirectX[®] 运行库，则可以使用该选项。如果计算机没有专用显卡，则可能需要切换至**软件渲染**，以获取相对较慢但完整的图形功能。请访问以下链接，获取建议的显卡列表：

cn.comsol.com/system-requirements

创建新模型

您可以遵循**模型向导**的指示来建立模型，也可以使用**空模型**开始建模操作，如下图所示。



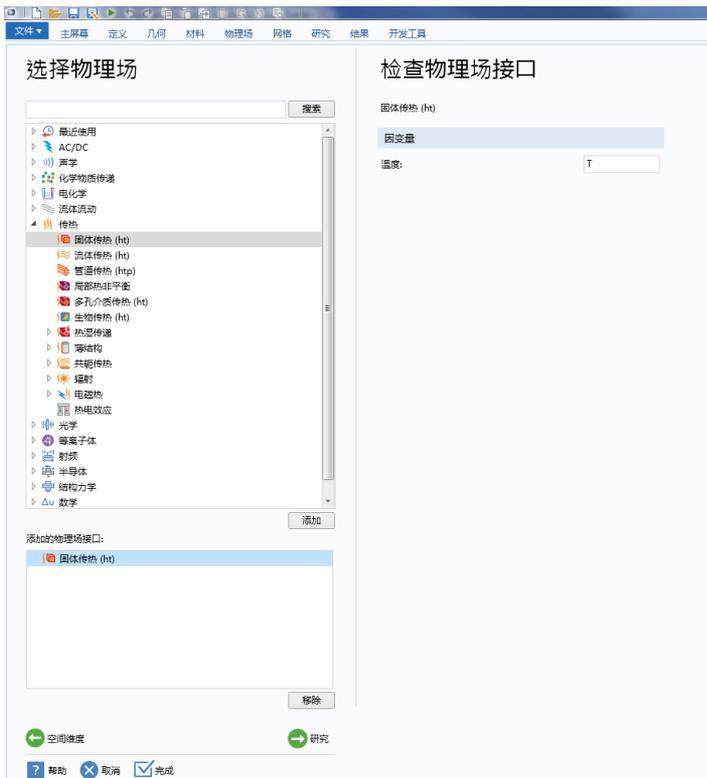
遵循模型向导创建模型

“模型向导”将引导您设置空间维度、物理场及研究类型，步骤如下：

- 1 首先，为模型组件选择空间维度：三维、二维轴对称、二维、一维轴对称或零维。



- 2 现在，添加一个或多个物理场接口。这些接口根据不同的物理方向来归类，以便快速查找。这些分支并不直接和产品模块相对应。在 COMSOL Multiphysics 安装中添加产品模块时，一个或多个分支下会填充附加的物理场接口。



3 选择“研究”类型，表示将用于计算的求解器或求解器集。



最后，单击完成。此时桌面会显示根据“模型向导”中的选择进行配置的模型树。

创建空模型

空模型选项将打开不含任何组件或研究的 COMSOL Desktop 界面。可以右键单击模型树，添加特定空间维度的组件、物理场接口或研究。

功能区和快速访问工具栏

COMSOL Desktop 环境中的功能区选项卡反映了建模工作流程，并提供了每个建模步骤可用的功能概述，包括基于模型构建仿真 App。



主屏幕选项卡包含的按钮可用于更改模型、运行仿真以及开发和测试 App 等最常用的操作。例如，更改模型参数以执行参数化几何，检查材料属性和物理场，构建网格，运行研究以及将仿真结果可视化。

建模过程中的每个主要步骤均有对应的标准选项卡。按工作流程从左到右依次为：定义、几何、材料、物理场、网格、研究、结果及开发工具。

上下文选项卡仅在需要时显示，例如三维绘图组选项卡，仅在添加相应的绘图组或在模型树中选择相应节点时显示。



模式选项卡用于某些特定的操作，此时功能区中的其他操作会暂时变得无关紧要。工作平面模式选项卡便是一个例子。在处理工作平面时，不会显示其他无关操作的选项卡。



功能区 vs. 模型开发器

功能区用于快速访问各种命令，并对**模型开发器**窗口中的模型树进行补充。功能区提供的大部分功能也可以通过右键单击模型树中的节点，从弹出的上下文菜单进行访问。某些操作只能通过功能区实现，例如选择显示哪个桌面窗口。在 macOS 和 Linux[®] 系统的 COMSOL Desktop 界面中，则使用工具栏代替功能区提供此功能。也有一些操作只能在模型树中实现，例如重新排序和禁用节点。

快速访问工具栏

快速访问工具栏包含的一组命令与当前显示的功能区选项卡相互独立。您可以定制**快速访问工具栏**，添加文件菜单中提供的大部分命令，包括撤消和重做最近的动作、复制、粘贴、生成副本以及删除模型树中的节点等命令。也可以选择将**快速访问工具栏**置于功能区的上方或下方。

MACOS 和 LINUX[®]

在 macOS 和 Linux[®] 系统的 COMSOL Desktop 环境中，功能区由一组菜单和工具栏代替。



本书中的操作说明基于 Windows[®] 版本的 COMSOL Desktop 环境。不过，在 macOS 和 Linux[®] 上，COMSOL Multiphysics 和 COMSOL Desktop 环境的运行方式非常类似，您只需记住，可以在对应的菜单和工具栏中找到功能区用户界面组件。

模型开发器和模型树

使用“模型开发器”时，可通过以下操作开始构建模型：在默认模型树中添加节点并编辑节点设置。

默认模型树中的所有节点均为顶层父节点。可以右键单击这些节点以查看可在其中添加的子节点的列表。这是将节点添加到模型树的方式。

单击某个子节点时，可以在设置窗口中查看其节点设置。您可以在此编辑节点设置。

值得注意的是，如果已打开帮助窗口（从文件菜单中选择帮助或按功能键 F1），则在单击节点时，还可以获取动态帮助。

根节点、全局定义和结果节点

模型树始终包含根节点（初始标签为 Untitled.mph）、全局定义节点和结果节点。根节点的标签是用来保存模型的多物理场模型文件（或 MPH 文件）的名称。根节点包含作者姓名、默认单位制等设置。

默认情况下，全局定义节点包含参数和材料子节点，可供您定义在整个模型树中使用的参数、变量、函数及耦合。例如，可用于定义材料属性、力、几何及其他相关特



征的值与函数依赖关系。**全局定义**节点本身不含任何设置，但其子节点包含许多设置。**材料**子节点用于存储材料属性，可在模型的**组件**节点中引用。

结果节点可供访问通过执行仿真得到的解，其中还提供多个数据处理工具。**结果**节点最初包含五个子节点：

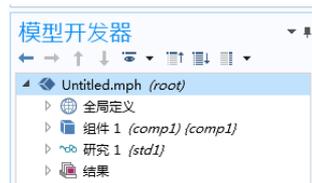
- **数据集**：包含一组可供使用的解。
- **派生值**：使用大量后处理工具来定义要从解中派生的值。
- **表格**：一个非常方便的目标位置，用于存储探针生成的**派生值**或**结果**，这些探针在仿真运行期间实时监控解。
- **导出**：定义要导出至文件的数值数据、图像及动画。
- **报告**：包含自动生成或定制模型报告，格式为 HTML 或 Microsoft® Word。



除了这五个默认子节点，您还可以添加更多**绘图组**子节点，用于定义要在**图形**或**绘图**窗口中显示的图形。其中一些节点可根据所执行的仿真类型自动创建，但您也可以右键单击**结果**节点，并从绘图类型列表中进行选择来包含其他图形。

组件和研究节点

除上述三个节点外，还有其他两类顶层节点：**组件**节点和**研究**节点。这些节点通常在创建新模型时由“模型向导”创建。使用“模型向导”指定要建模的物理场类型以及要执行的研究类型（如稳态、瞬态、频域或特征频率分析）后，“模型向导”会自动为每种类型创建一个节点，并显示其内容。



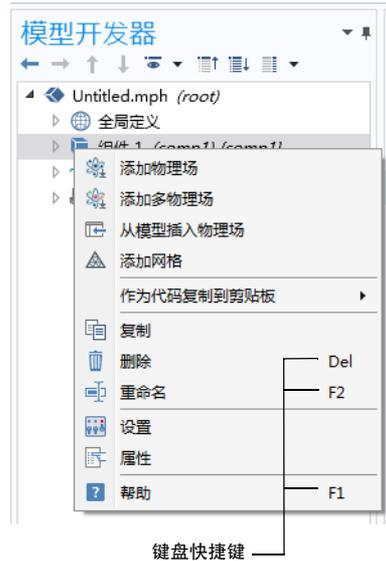
您还可以在开发模型时添加更多的组件和研究节点。模型可以包含多个组件和研究节点，如果它们的名​​称都相同，则可能会引起混乱。因此，可以根据这些节点类型各自的用途对其重命名。

如果模型包含多个组件节点，可以将其耦合在一起，形成一系列更为复杂的仿真步骤。

请注意，每个研究节点都可以执行不同类型的计算，因此每个节点都有单独的**计算按钮** 。

具体而言，假设您要构建一个模拟线圈装配的模型，该装配由线圈和线圈外壳两部分组成。可以创建两个组件节点，其中一个对线圈建模，另一个则对线圈外壳建模。然后，可以使用对象名称来重命名每个节点。同样，也可以创建两个研究节点，第一个模拟装配的静态或稳态行为，第二个则模拟频率响应。可将这两个节点重命名为**稳态**和**频域**。模型完成后，将其保存到名为 **Coil Assembly.mph** 的文件中。此时，“模型开发器”中的模型树如下图所示。

图中的根节点名为 **Coil Assembly.mph**，指明用于保存模型的文件。**全局定义**节点和**结果**节点都具有默认名称。此外，还有两个**组件**节点和两个**研究**节点使用前面段落中选择的名称。



参数、变量和范围

全局参数

全局参数是用户定义的常数标量，可在整个模型中使用。也就是说，这些参数具有“全局”性质。其重要用途包括：

- 参数化几何尺寸。
- 指定网格单元大小。
- 定义参数化扫描（即针对频率或载荷等各种不同的参数值反复运行仿真）。

全局参数表达式可以包含数字、全局参数、内置常数、使用全局参数表达式作为变元的内置和用户定义函数，以及一元和二元运算符。有关可用运算符的列表，请参见第 166 页的“附录 C - 语言元素和保留名称”。由于这些表达式会在仿真开始前进行计算，因此全局参数与时间变量 t 不相关。同样，这些参数与空间变量（如 x 、 y 或 z ）或方程要求解的因变量都不相关。

请注意，参数名称区分大小写。

可以在模型树的全局定义下的参数节点中定义全局参数。

名称	表达式	值	描述
r0	20e-6[m]	2E-5 m	Spiral starting radius
a1	10e-6[m]	1E-5 m	Coil width
a_tot	a1*2	2E-5 m	Spiral lap width
laps	3	3	Number of revolved la...
w_tot	2*pi*laps	18.85	Total revolved angle
c_ref	500[mol/m^3]	500 mol/m ³	Reference concentrati...
D_Cu	4.5e-10	4.5E-10	Diffusion coefficient
d_dl	50e-6[m]	5E-5 m	Diffusion layer thickness
Eeq_Cu	0.34[V]	0.34 V	Equilibrium potential C...
d_pr	10e-6[m]	1E-5 m	Photoresist layer thick...
i_avg	-10[A/dm^2]	-1000 A/m ²	Average cathode curre...
i0	10[A/m^2]	10 A/m ²	Exchange current dens...
alpha_a	1.5	1.5	Anode transfer coeffici...
alpha_c	0.5	0.5	Cathode transfer coeff...
sigma	10[S/m]	10 S/m	Electrolyte conductivity

名称: r0

表达式: 20e-6[m]

描述: Spiral starting radius

结果参数

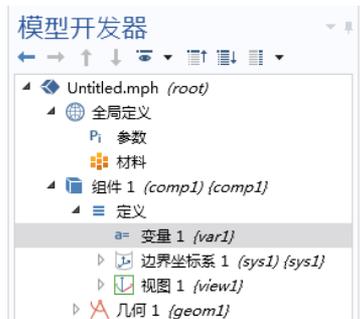
为了实现更高的灵活性，可定义仅在结果节点中使用的参数。使用这些参数时无需解析模型。



结果参数可能取决于其他参数和内置函数。

变量

变量在模型树中具有关联的变量节点，可在全局定义节点中定义，也可在任意组件节点的定义子节点中定义。



当然，选择在何处定义变量取决于您希望该变量是全局（即在整個模型树中可用）的，还是在单个组件节点内进行局部定义。与参数表达式类似，变量表达式可以包含数字、参数、内置常数以及一元和二元运算符。不过，变量表达式还可以包含变量（如 t 、 x 、 y 或 z ）；以变量表达式为变元的函数；以及要求解的因变量及其空间和时间的导数。

App 中使用的变量

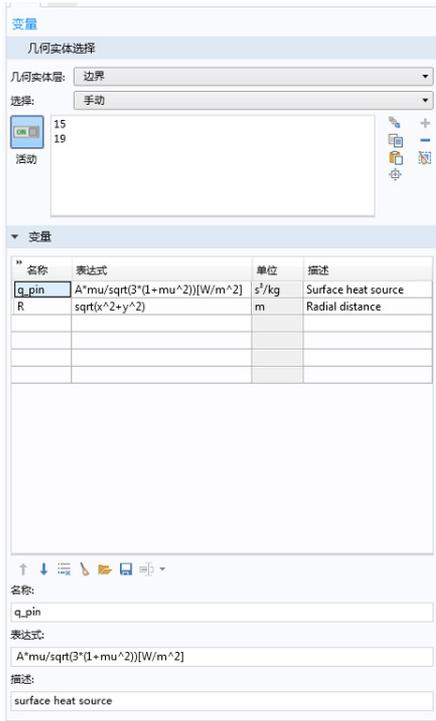
模型参数和变量可在 App 中使用。例如，您可以让 App 用户更改参数值。此外，还可以在“App 开发器”中 App 树的声明节点下定义要在 App 中使用的变量。此类变量也能在模型方法中使用。

范围

参数或变量的“范围”是一条声明该参数或变量在表达式中的使用位置的语句。所有全局参数均在模型树的**全局定义**节点中定义为**参数**子节点。这意味着它们的范围是全局性的，可在整个模型树中使用。

变量也可以在“全局定义”节点中定义为**变量**子节点，此时变量具有全局范围，但受到其他限制。例如，变量不能用于**几何、网格或研究**节点（在确定仿真停止时间的表达式中使用变量的情况除外）。

在**组件**节点的**定义**子节点下定义的变量具有局部范围，仅在这一特定**组件**中使用（但同样不用于**几何或网格**节点）。例如，这些变量可用于在**组件的材料**子节点中指定材料属性，或用于指定边界条件或相互作用。有时，需要将变量的范围限制在几何的特定部分，如某些边界。为此，变量的设置中提供了一些预设值，可供选择是将定义应用于整个**组件**几何，还是仅应用于某个**域、边界、边或点**。



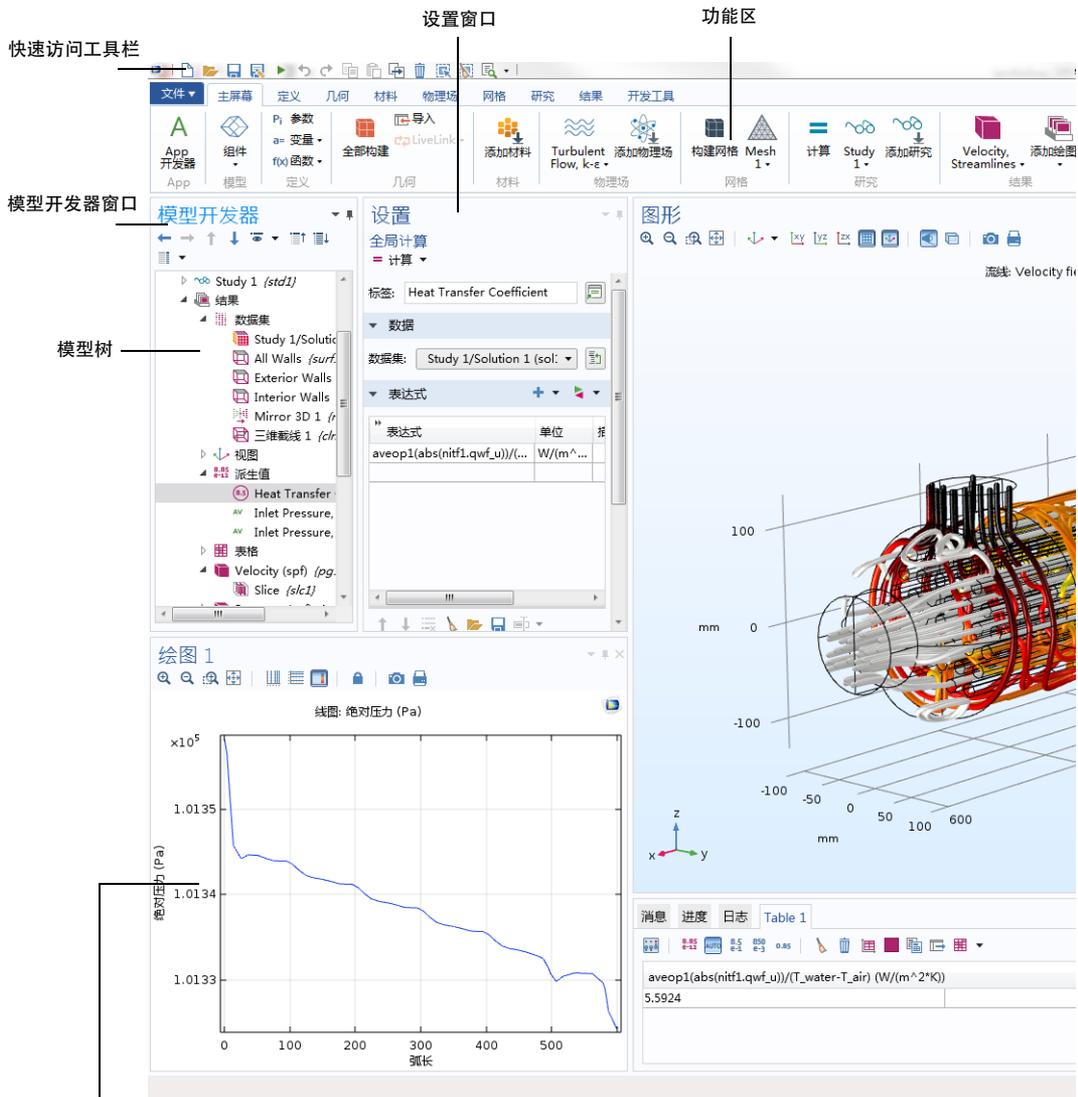
左图显示两个变量 q_{pin} 和 R 的定义，其范围限制为编号 15 和 19 标识的两个边界。

这样一组编号称为**选择**，可以进行命名，然后在模型的其他位置进行引用。例如，在定义将在特定边界（而非其他位置）使用变量的材料属性或边界条件时，这非常有用。要为**选择**命名，可以单击**选择**列表右侧的**创建选择**按钮。

尽管在**组件 > 定义**节点下的**变量**子节点中定义的变量已指定为具有局部范围，但在模型树的**组件**节点外仍可通过具体的标识对其进行访问。此操作可以通过“点表示法”实现，即在变量名称前加上定义该变量的**组件**节点的名称，两者通过“点”来连接。换言之，如果在名为 **MyModel** 的**组件**节点中定义了名为 **foo** 的变量，则可使用

MyModel.foo 在“组件”节点外访问此变量。例如，要在**结果**节点中使用该变量绘图时，此功能非常有用。在“App 开发器”的**声明**节点下定义的“变量”可在表单对象和方法中全局使用，但不能用于“模型开发器”。

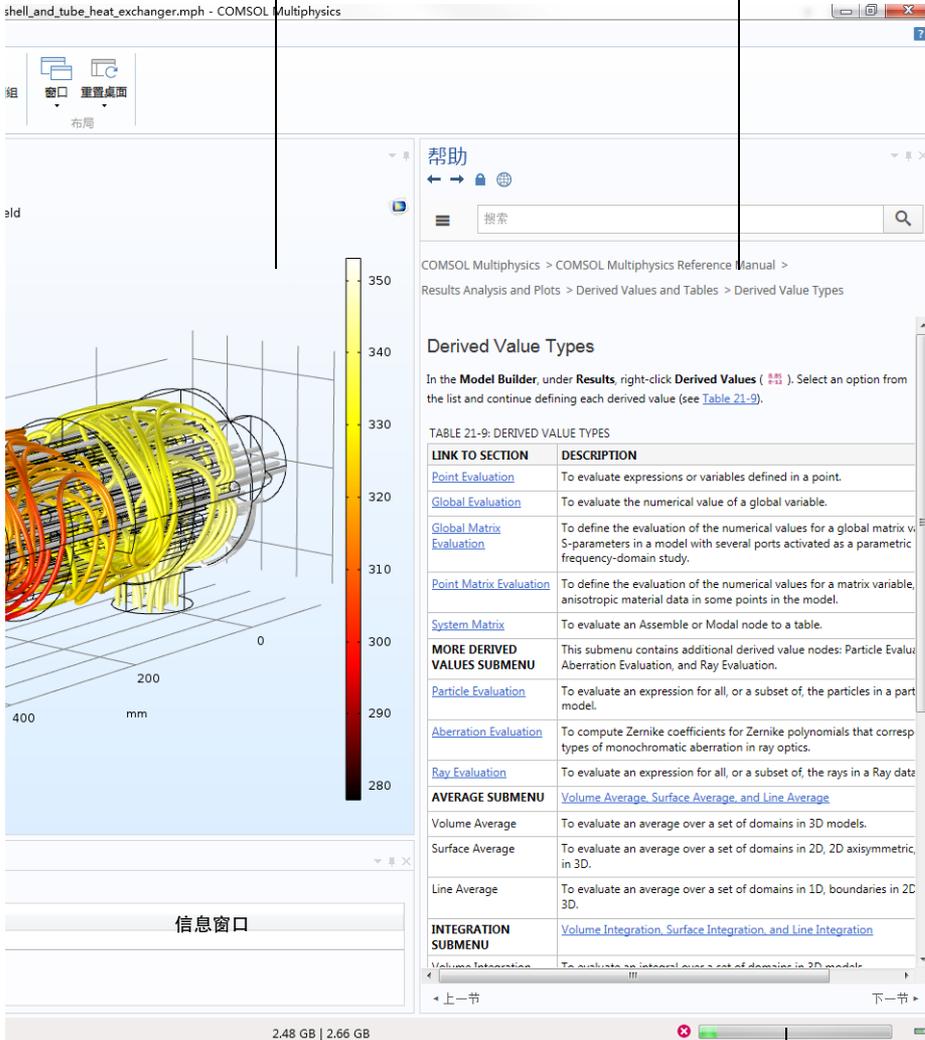
以下跨页图片显示含附加窗口的定制桌面示例。



绘图窗口 - 用于可视化“结果”物理量、探针和收敛图。
可以使用多个“绘图”窗口同时显示多个结果。

图形窗口

动态帮助 - 持续更新, 可在线访问“知识库”和“案例下载”页面。“帮助”窗口可供您轻松浏览, 并提供扩展的搜索功能。



带取消按钮的进度条

内置常数、变量和函数

COMSOL Multiphysics 包含许多内置的常数、变量及函数，用户不能重新定义它们的保留名称。如果用户定义的变量、参数或函数使用保留名称，则输入的文本会变为橙色（警告）或红色（错误），并且用户在选择文本字符串时，将看到一条工具提示消息。

以下是一些重要示例：

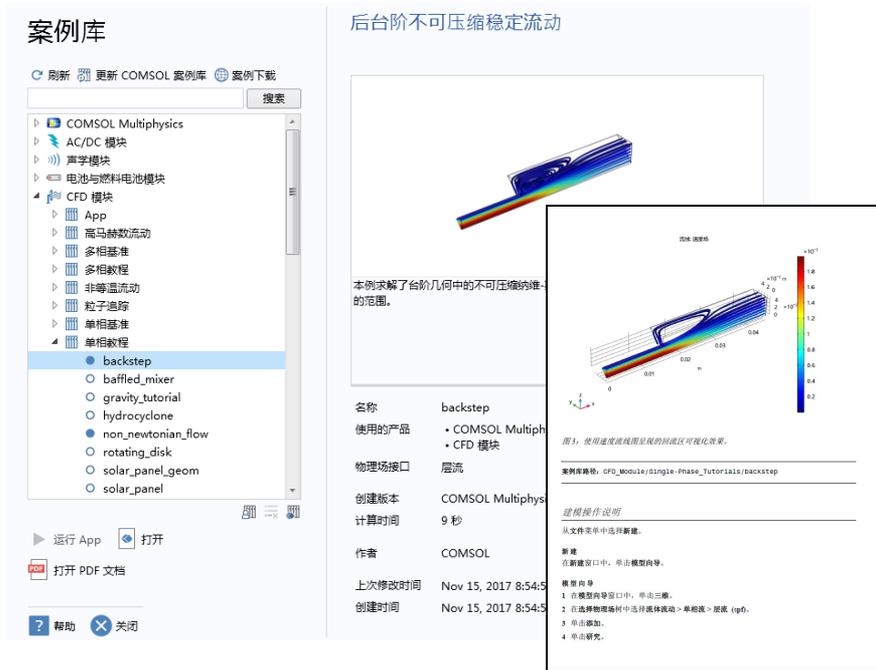
- 数学常数（如 `pi` (3.14...)）或虚部单位 `i` 或 `j`
- 物理常数，如 `g_const`（重力加速度）、`c_const`（光速）或 `R_const`（通用气体常数）
- 时间变量，`t`
- 因变量（解）的一阶和二阶导数，其名称派生自空间坐标名称和因变量名称（用户定义的变量）
- 数学函数，如 `cos`、`sin`、`exp`、`log`、`log10` 和 `sqrt`

有关更多信息，请参见第 166 页的“附录 C - 语言元素和保留名称”。

案例库

“案例库”是 MPH 文件的集合，包含教学案例、可运行的 App 以及随附文档。教学案例演示如何使用“模型开发器”，附带的文档包含理论背景和分步操作说明。可运行的 App 附带如何使用该 App 的操作说明。您可以非常方便地检查并编辑所有教学模型及 App，并将其个性化。每个基于物理场的附加模块都有自带的案例库，其中包含特定于其应用和物理领域的示例。您可以使用这些分步操作说明和 MPH 文件作为建模的模板。

要打开案例库窗口，可以从主屏幕工具栏的窗口菜单中选择案例库 ，也可以从文件菜单中选择 。然后，按 App 名称进行搜索，或在模块文件夹名称下浏览。



单击打开 、运行 App  或打开 PDF 文档 。此外，也可以从文件菜单中选择帮助 > 文档，然后按 App 名称进行搜索或按模块浏览。请注意，运行 App 选项仅适用于作为可运行 App 的 MPH 文件。

“案例库”中的 MPH 文件可具有两种格式 - “完整” MPH 文件或“压缩” MPH 文件：

- “完整” MPH 文件包含所有网格和解。在“案例库”窗口中，这些文件带有  图标。如果 MPH 文件大小超过 25 MB，则将光标悬停在“案例库”树中的模型节点上时，会出现“大文件”文本提示，并包含文件大小信息。
- “压缩” MPH 文件包含模型的所有设置，但不包含已构建的网格和解数据，以节省 DVD 空间或下载映像。某些 MPH 文件由于其他一些原因而不包含解，其计算时间非常短，并且很容易重新生成结果。您可以打开这些文件来研究其设置，并进行网格剖分和重新求解。还可在更新“案例库”时下载大多数文件的完整版本（含网格和解）。在“案例库”窗口中，此类文件带有

○ 图标。如果将光标悬停在“案例库”窗口的压缩文件上，会显示一条消息，提示**未存储解**。如果有完整 MPH 文件可供下载，相应节点的上下文菜单会包含**下载含解的文件**  选项。

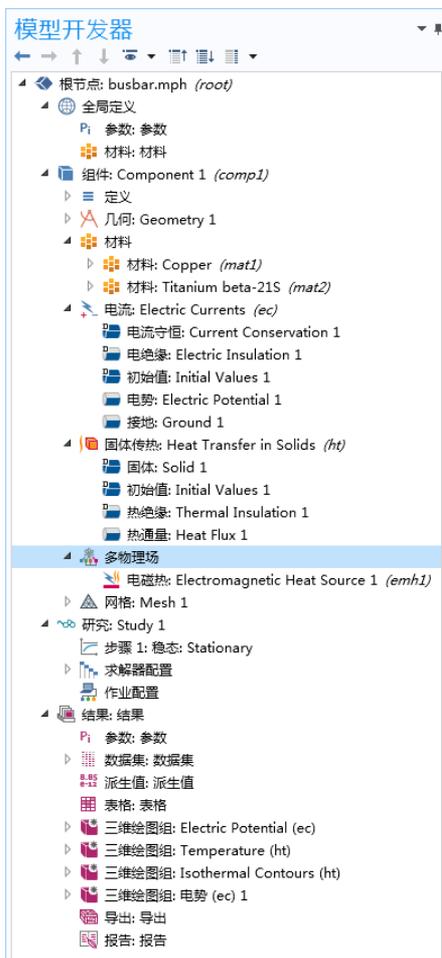
COMSOL 会定期更新“案例库”。要检查所有可用的更新，单击**案例库**窗口顶部的**更新 COMSOL 案例库** 。也可以从**文件 > 帮助**菜单（Windows® 用户）或从**帮助**菜单（macOS 和 Linux® 用户）找到此选项。通过此操作，您可以连接到 COMSOL 网站，并在此访问新的 App 和最近的更新。



如果您的计算机已连接 Internet，则可以单击**案例下载**按钮，从 COMSOL 网站访问各种不同的附加示例。

工作流程和操作序列

在模型开发器窗口，从定义全局变量到最终生成结果报告，建模过程中的每一步都显示在模型树中。



模型树从上到下定义了一个有序的操作序列。

在模型树的以下分支中，节点顺序会影响操作序列，您可以在模型树中上下移动子节点来更改操作序列：

- 几何
- 材料

- 物理场
- 网格
- 研究
- 绘图组

在模型树的**组件 > 定义分支**中，以下节点类型的顺序也会对操作序列产生影响：

- 完美匹配层
- 无限元

可通过以下方法对节点重新排序：

- 拖放
- 右键单击节点并选择**上移**或**下移**
- 按 **Ctrl + 向上箭头** 或 **Ctrl + 向下箭头**

在其他分支中，节点顺序对操作序列的影响不大，但可以对某些节点重新排序使其更易于查看。例如**全局定义**的子节点。

通过选择**文件**菜单中的**压缩历史记录**，并将模型另存为 **MATLAB[®]** 模型文件或 **Java[®]** 模型文件，可以查看以程序代码语句呈现的操作序列。请注意，模型历史记录可以保留您在构建模型时的完整更改记录。因此，其中包含您做出的所有更正，包括对参数和边界条件的更改以及对求解器方法的修改。压缩历史记录时会移除所有替代的更改，并保留最近建模步骤的原始副本。在“**App 开发器**”的“**方法编辑器**”中，可以使用**录制方法**选项来查看并编辑程序代码语句。

在 **COMSOL Desktop** 界面和“**模型开发器**”的使用过程中，您会逐渐发现这一有序又简便的方法所带来的诸多优势。不过，对用户界面的任何描述都比不上您动手操作的亲身体会。在接下来的章节中，我们将邀请您着手完成两个仿真示例，进一步熟悉软件。

示例 1：扳手结构分析

这是一个非常简单的示例，无需安装 COMSOL Multiphysics® 的任何附加产品即可运行。如需更多特征完整的结构力学模型，请参见“结构力学模块”案例库。

在您的日常生活中，可能会使用扳手拧紧螺栓。本练习将向您介绍结构力学模型，并分析扳手在承受最大载荷时的结构完整性。

扳手通常由钢这种延性材料制成。如果作用扭矩过大，当扭力超过其屈服应力水平时，扳手会由于钢的弹塑性行为而发生永久变形。要分析扳手手柄的尺寸是否合适，可以检查机械应力水平是否在屈服应力极限范围内。

本教程简单介绍了“模型开发器”的工作流程。首先打开“模型向导”，并添加固体力学物理场选项。然后导入几何，并选择 steel 作为材料。接下来，通过创建模型来探索其他关键步骤，包括：定义载荷的参数和边界条件；在“图形”窗口中选择几何实体；定义“网格”和“研究”；最后，通过数值和可视化来检查结果。

如果您希望使用更高级的模型进行练习，请先阅读本节以熟悉一些关键特征，然后再阅读教程第 54 页的“示例 2：母线板 - 多物理场模型”。

模型向导

- 1 要启动软件，双击桌面上的 COMSOL Multiphysics 图标，您将看到“新建”窗口，其中包含两个用于新建模型的选项：**模型向导**和**空模型**。



如果选择空模型，则可以在模型树中右键单击根节点，手动添加组件和研究。对于本教程，单击模型向导按钮。

如果 COMSOL Desktop 用户界面已打开，可以从文件菜单中选择新建来启动“模型向导”。选择模型向导。

“模型向导”将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。



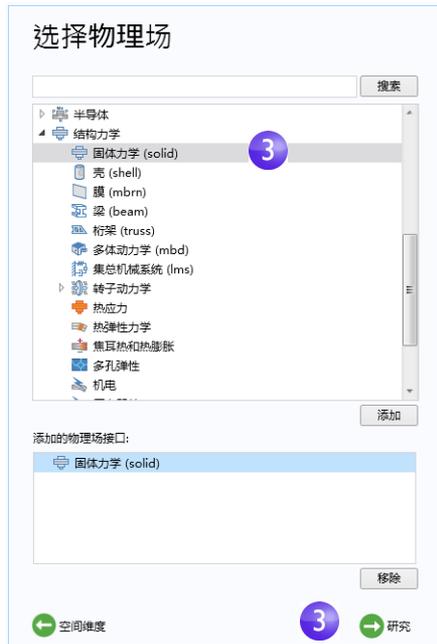
2 在选择空间维度窗口中选择“三维”。



3 在选择物理场中选择结构力学 > 固体力学 (solid)。单击添加。

在没有附加模块的情况下，固体力学是结构力学文件夹中唯一可用的物理场接口。右图显示在安装了所有附加模块时的结构力学文件夹的一部分。

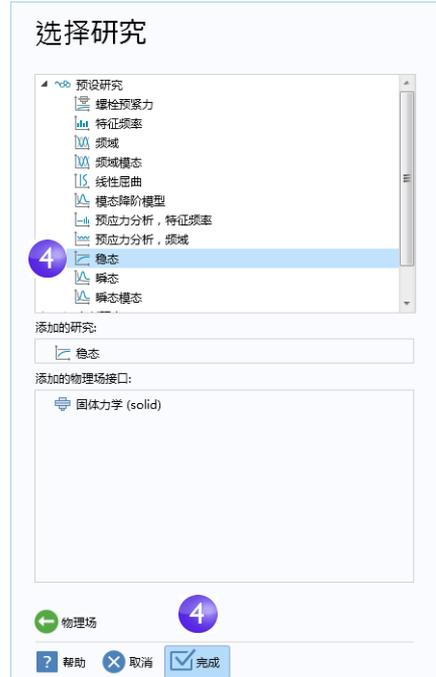
单击研究 继续操作。



4 单击预设研究下的稳态 。完成操作后，单击完成 。

“预设研究”包含适合所选物理场（本例中为固体力学）的求解器和方程设置。本案例使用稳态研究类型 - 无时变载荷或材料属性。

从定制研究分支  中所做的任何选择均需手动设置。



几何

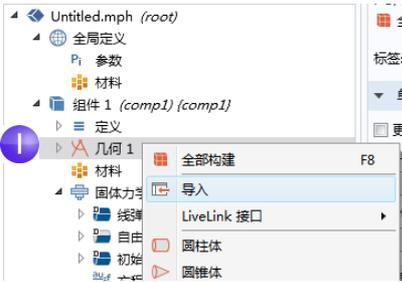
本教程使用先前创建的、以 COMSOL 原生 CAD 格式 .mphbin 存储的几何。如需了解如何构建您自己的几何，请参见第 146 页的“附录 A - 构建几何”。

文件位置

包含本练习中所用文件的案例库的位置根据软件安装和操作系统的不同而有所变化。在 Windows® 系统中，文件路径类似于：

C:\Program Files\COMSOL\COMSOL53a\Multiphysics\applications。

- 1 在“模型开发器”窗口的**组件 1**下，右键单击**几何 1** 并选择**导入**。



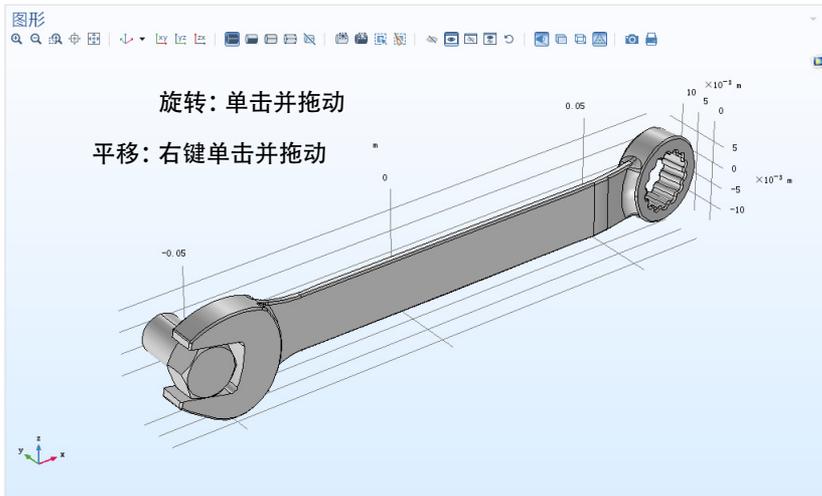
或者，也可以从功能区的几何选项卡中单击**导入**。

- 2 在导入的设置窗口中，从源列表中选择 **COMSOL Multiphysics** 文件。



- 3 单击**浏览**，并在 COMSOL 安装文件夹的案例库文件夹中找到 **wrench.mphbin** 文件。在 Windows® 系统中，默认位置为：
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL53a\Multiphysics\
applications\COMSOL_Multiphysics\ Structural_Mechanics\wrench.mphbin
双击进行添加，或单击**打开**。

4 单击导入以在图形窗口中显示几何。



5 单击图形窗口中的扳手几何，并试着四处移动该对象。当您指向或单击该几何时，其颜色会发生变化。单击图形窗口工具栏中的放大 、缩小 、切换到默认三维视图 、缩放到窗口大小 及透明 按钮，观察几何的变化：

- 要旋转模型，可在图形窗口中的任意位置单击并拖动。
- 要移动模型，右键单击并拖动。
- 要缩放模型，单击并按住鼠标滚轮后拖动。
- 要返回原始位置，单击工具栏中的切换到默认三维视图  按钮。

有关附加信息，另请参阅第 162 页的“附录 B - 键盘和鼠标快捷方式”。

导入的模型包含两个部分或域，分别对应于螺栓和扳手。本练习将重点分析扳手中的应力。

材料

材料节点  存储了组件节点中所有物理场和域的材料属性。我们需要为螺栓和工具使用同一种通用钢材料。以下步骤显示如何在“模型开发器”中选择材料。

1 打开添加材料窗口。

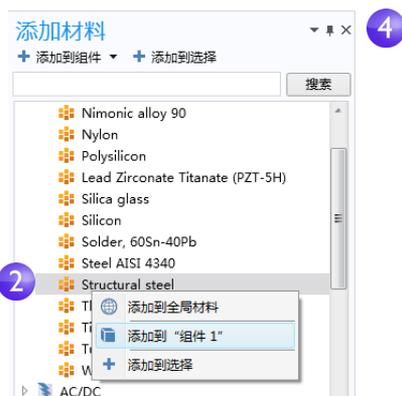
可以通过以下两种方式打开“添加材料”窗口：

- 在模型开发器中，右键单击组件 1 > 材料  并选择从库中添加材料 。



- 从功能区选择主屏幕选项卡，然后单击添加材料。

2 在“添加材料”窗口中，单击以展开内置材料文件夹。向下滚动找到 Structural steel，然后右键单击并选择添加到组件 1。



3 在材料的设置窗口中检查材料属性明细栏，查看可用的属性。在仿真过程中，物理场使用的属性会带有绿色复选标记。

4 关闭添加材料窗口。

属性	变量	值	单位	属性组
<input checked="" type="checkbox"/> 密度	rho	7850[kg/m^3]	kg/m ³	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 杨氏模量	E	200e9[Pa]	Pa	杨氏模量和泊松比
<input checked="" type="checkbox"/> 泊松比	nu	0.30	1	杨氏模量和泊松比
相对磁导率	mur_iso ; m...	1	1	基本
恒压热容	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	基本
导热系数	k_iso ; kii = ...	44.5[W/(m*K)]	W/(m·K)	基本
电导率	sigma_iso ; ...	4.032e6[S/m]	S/m	基本
相对介电常数	epsilon_r_is...	1	1	基本
热膨胀系数	alpha_iso ; ...	12.3e-6[1/K]	1/K	基本
Murnaghan 三阶弹性模量	l	-3.0e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan
Murnaghan 三阶弹性模量	m	-6.2e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan
Murnaghan 三阶弹性模量	n	-7.2e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan
Lamé 参数 λ	lambLame	1.15e11[Pa]	N/m ²	Lamé 参数
Lamé 参数 μ	muLame	7.69e10[Pa]	N/m ²	Lamé 参数

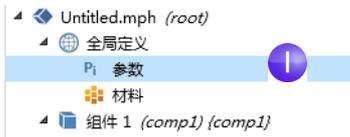
- 如需了解有关材料使用的更多信息，另请参见母线板教程章节：第 65 页的“材料”和第 102 页的“定制材料”。

全局定义

现在，我们将定义全局参数来指定对扳手施加的载荷。

参数

- 在模型开发器的全局定义  节点下，选择参数 P_1 。



- 转到参数的设置窗口。在参数表中输入以下设置：

- 在名称列或编辑框中，输入 F。
- 在表达式列或编辑框中，输入 150[N]。方括号表示法用于将物理单位与数值相关联，在本例中，力的单位是牛顿。在您离开编辑框或按回车键时，值列会基于输入的表达式自动更新。
- 在描述列或编辑框中，输入作用力。

参数			
名称	表达式	值	描述
F	150[N]	150 N	作用力

2

- 如果参数表包含多个条目，您可以通过单击特定列的相应表头对表格排序。

有关参数使用的更多信息，请参见第 59 页的“全局定义”和第 98 页的“参数、函数、变量和耦合”章节。

至此，您已完成添加物理场和研究、导入几何、添加材料以及定义一个参数。现在，**模型开发器**节点序列应与右图相符。**固体力学**下的默认特征节点在节点图标  左上角以 **D** 表示。

固体力学的默认节点包括：**线弹性材料**、**自由**和**初始值**。

线弹性材料节点是**固体力学**接口的默认材料模型。**自由**节点是边界条件，允许所有边界在无约束或载荷的情况下自由移动。**初始值**节点用于指定非线性或瞬态分析的初始位移和速度值（在本案例中不适用）。



默认的物理场节点不能被移除。您可以添加附加节点来指定与默认节点不同的物理场设置。这些附加节点可以替代默认节点及其他节点的设置，也可以起到一定的帮助作用。有关更多信息，请参见第 113 页的“替代和贡献：独占和贡献节点”。

您可以随时保存模型，稍后再以保存时的状态将其打开。

3 从“文件”菜单中选择**文件 > 另存为**。浏览至您拥有写权限的文件夹，将文件另存为 **wrench.mph**。

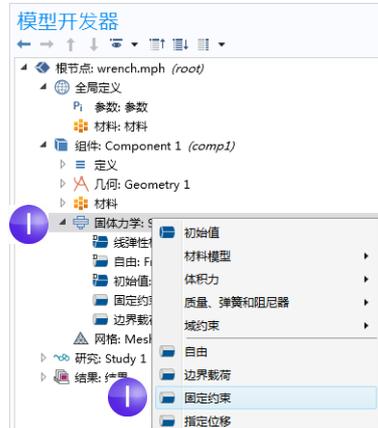
物理场和边界条件

定义几何与材料后，此时即可开始设置边界条件。

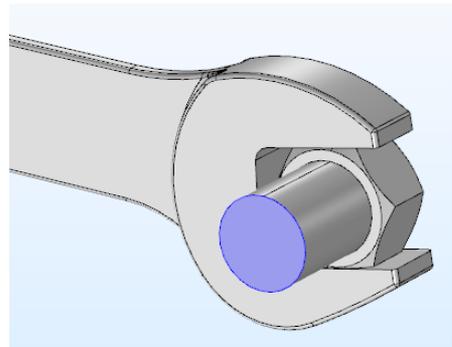
- 1 在模型开发器中，右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**固定约束**。

此边界条件将边界表面上每个点在所有方向的位移均约束为零。

也可以使用功能区从**物理场**选项卡中选择**边界 > 固定约束**。



- 2 在图形窗口中，通过单击窗口中的任意位置并将扳手拖动到如图所示的位置，可以旋转几何。单击部分建模螺栓暴露的前表面。该边界变成蓝色，表明已被选中。选择列表中的边界编号应为35。



- 3 单击图形工具栏中的**切换到默认视图**按钮，将几何还原为默认视图。



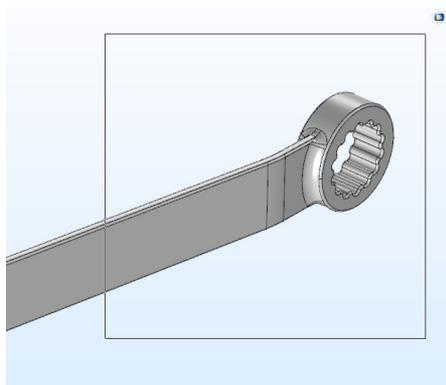
- 在模型开发器中，右键单击固体力学 (solid) ，然后选择边界载荷。边界载荷节点 将添加到模型开发器序列中。



边界载荷节点上显示的“警告”属性表明，其边界选择为空。下一步是选择边界。

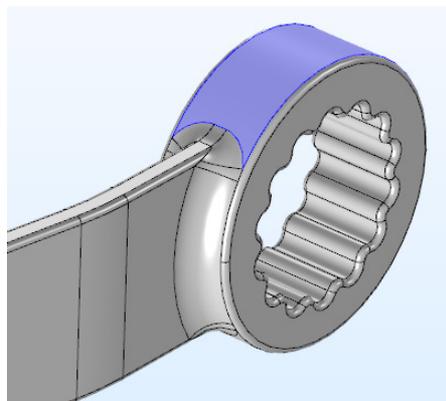
- 在图形窗口中，单击工具栏中的缩放框按钮 ，然后拖动鼠标选择右图所示的方形区域。释放鼠标按钮，将选定区域放大。

5



- 单击边界以选择顶部套接面（边界 111），将其突出显示为蓝色，并添加到选择列表。

6



7 在边界载荷设置窗口的力栏下，选择总力作为载荷类型，然后在 z 分量的文本框中输入 $-F$ 。负号表示负 z 方向（向下）。通过这些设置，150 N 的载荷将均匀分布在选定的表面上。

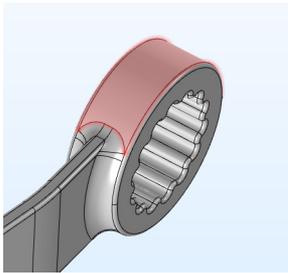


请注意，为简化建模过程，可以使用材料界面边界条件来近似描述螺栓与扳手之间的机械接触。这种内部边界条件是自动定义的，可以保证法向应力与跨材料界面位移的连续性。使用结构力学模块，可以进行包括机械接触在内的更详细的分析。

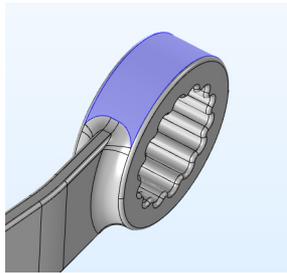
选择边界和其他几何实体

当边界处于未选中状态时，其颜色通常为灰色，但在使用材料中的材料外观设置时例外，请参见第 69 页。要选择边界，请先将光标悬停在该边界上。边界会以红色突出显示（假定该边界之前未选中）。此时，单击以使用鼠标左键选择该边界。边界现在变成蓝色，其编号将显示在相应边界条件设置窗口的选择列表中。一旦在选中边界后再次将光标悬停在其上方，该边界会变为绿色。如果单击以绿色突出显示的边界，该边界会取消选择，此时会再次变为灰色。相同的选择和取消选择技巧适用于几何对象、域、边界、边和点。

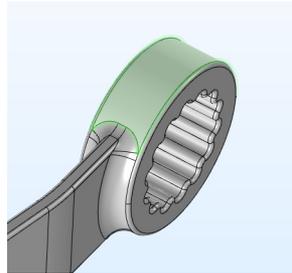
下图显示边界的不同选择状态。



突出显示用于选择



选定



突出显示用于取消选择

要选择隐藏在离您最近的表面后的内部曲面，可使用以下方法之一通过鼠标指针来循环选择边界：滚动鼠标滚轮、使用键盘的向上和向下箭头或在触摸板上使用两指拖动。

网格

网格设置可以确定用于离散模型的有限元网格的分辨率。有限元法可将模型分割为几何形状简单的小单元，本例中为四面体。在每个四面体中，使用一组多项式函数来近似得到结构位移场 - 对象在三个坐标方向的变形程度。

在本例中，由于几何包含较小的边和面，因此需要定义比建议的默认设置更细化的网格。这将能更好地解析应力场的变化，并得到更精确的结果。通过细化网格大小来提高计算精度时总是会牺牲计算速度，并且通常需要增加内存使用量。

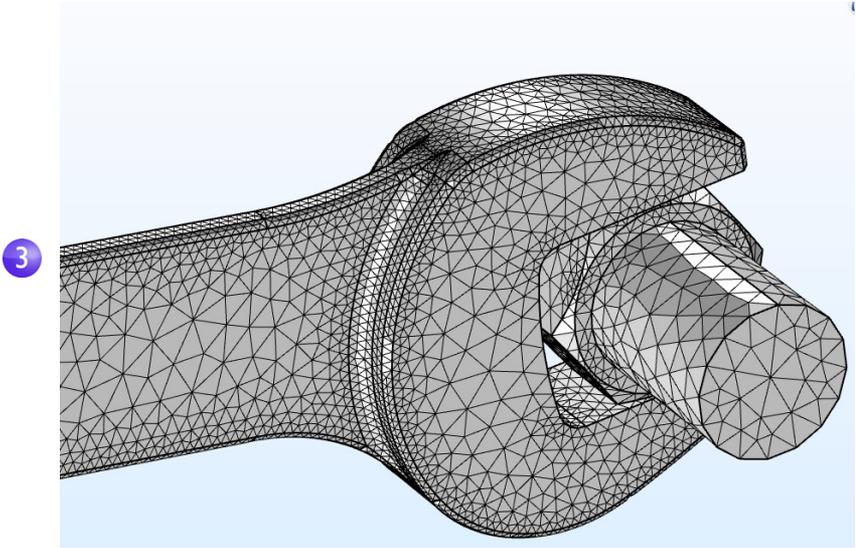
- 1 在模型开发器的组件 1 下，单击网格 1 。在网格设置窗口的网格设置栏下，从单元大小列表中选择较细化。



- 2 在设置窗口或网格工具栏中单击全部构建按钮 。

要求解生成的网格，需要大约 5 GB 内存。如果您的计算机 RAM 小于 5 GB，则可以从单元大小列表中选择细化（而非较细化）。

3 几秒钟后，网格将显示在图形窗口中。旋转扳手以查看单元大小分布。

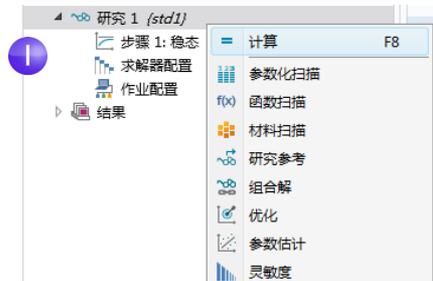


研究

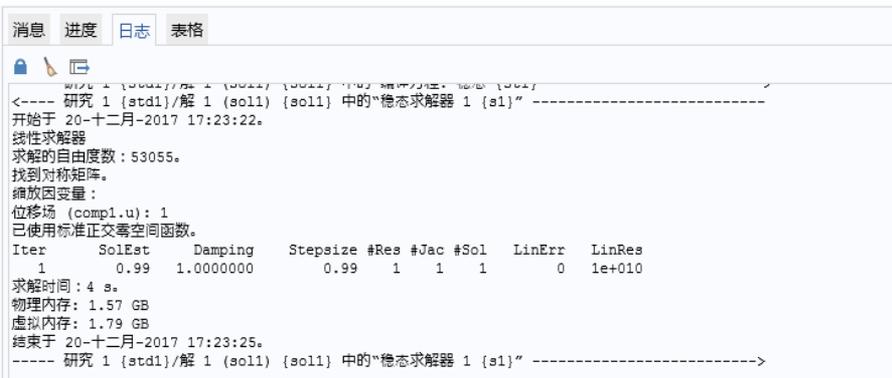
在开始建立模型时，您选择了**稳态研究**，即意味着将使用稳态求解器。为此，假设载荷、变形及应力不随时间发生变化。要启动求解器：

1 右键单击**研究 1** 并选择**计算**
= (或按 F8)。

经过几秒钟的计算后，默认绘图将显示在图形窗口中。在计算过程中，**进度窗口**会显示求解器的进度信息。计算完成后，您可以在**消息**和**日志窗口**中找到计算相关的其他有用信息；单击图形窗口下方的**消息**和**日志**选项



卡，可以查看此类信息。也可以从功能区主屏幕选项卡的窗口下拉列表中打开消息窗口。

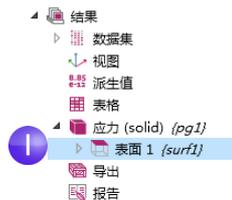


```
消息  进度  日志  表格
<---- 研究 1 {std1}/解 1 {sol1} {sol1} 中的“稳态求解器 1 {s1}” ----->
开始于 20-十二月-2017 17:23:22.
线性求解器
求解的自由度数: 53055.
找到对称矩阵.
缩放因变量:
位移场 (comp1.u): 1
已使用标准正交空间函数.
Iter      SolEst      Damping      Stepsize #Res #Jac #Sol      LinErr      LinRes
  1         0.99        1.00000000         0.99      1      1      1         0         1e+010
求解时间: 4 s.
物理内存: 1.57 GB
虚拟内存: 1.79 GB
结束于 20-十二月-2017 17:23:25.
----- 研究 1 {std1}/解 1 {sol1} {sol1} 中的“稳态求解器 1 {s1}” ----->
```

结果

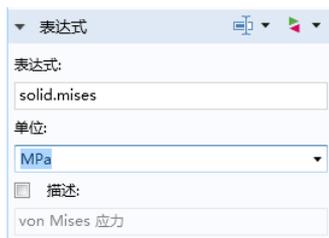
在图形窗口的默认“表面”图中显示了 von Mises 应力的结果，位移使用“变形”子节点进行了可视化。按照以下所示的步骤，将默认单位 (N/m^2) 改为更合适的 MPa。

- 1 在模型开发器中，展开结果 > 应力 (solid) 节点，然后单击表面 1。



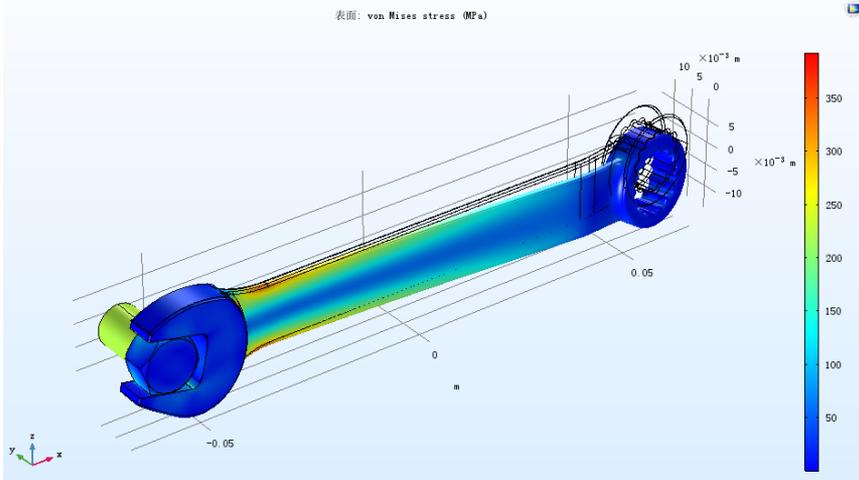
- 2 在设置窗口的表达式栏下，从单位列表中选择 MPa（或在编辑框中键入 MPa）。

2



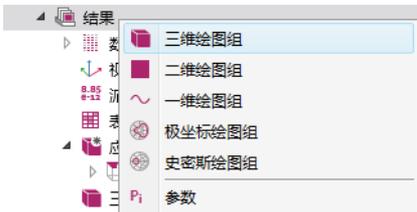
- 3 在表面图设置窗口的工具栏中单击绘制按钮 ，然后单击图形窗口工具栏中的切换到默认三维视图按钮 。

绘图显示了在施加垂直载荷时，螺栓与扳手中的 von Mises 应力分布情况。



对于扳手等工具使用的典型钢材，屈服应力约为 600 MPa，这意味着在 150 N 载荷（约对应于 34 磅力）作用下，扳手可能发生塑性变形。此外，您可能还需要考虑例如安全系数为 3 的一定安全裕度。要快速评估扳手的哪些部分存在塑性变形风险，可以绘制诸如 `solid.mises>200[MPa]` 的不等式表达式。

- 1 右键单击结果节点  并添加三维绘图组 。



2 右键单击三维绘图组 2 节点  并选择表面 。



3 在表面的设置窗口中，单击替换表达式按钮 ，然后选择模型 > 组件 1 > 固体力学 > 应力 > **solid.mises-von Mises 应力**（双击将其选中）。如果预先知道变量名称，也可在表达式框中直接输入 **solid.mises**。现在将该表达式编辑为：

solid.mises>200[MPa]。

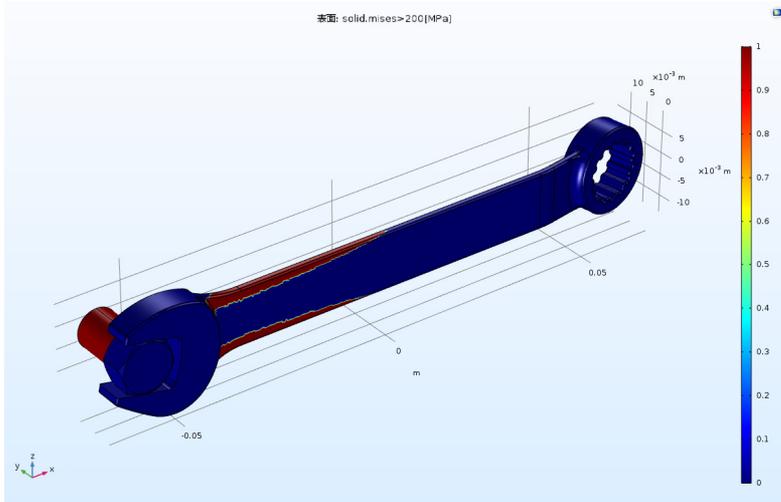


这是计算结果为 1 (true) 或 0 (false) 的布尔表达式。在表达式计算结果为 1 的区域，超出了安全裕度。

4 单击绘制按钮 。

5 在模型开发器中，单击三维绘图组 2。按 F2 键，并在重命名三维绘图组对话框中输入安全裕度。单击确定。

结果图显示螺栓中的应力较高，但本练习的主要研究对象是扳手。如果希望扳手在 150 N 的载荷下充分保证系数为 3 的安全裕度，需要稍微更改手柄设计，例如增加手柄宽度。



您可能已经注意到，制造商出于各种原因选择了不对称的扳手设计。因此，在翻转扳手时，应力场可能不同。现在，您可以尝试从相反方向施加相同的力，并将最大 von Mises 应力可视化，查看是否存在差异。

收敛性分析

为了检查计算得到的扳手中最大 von Mises 应力的精度，现在可以继续进行网格收敛性分析。为此，使用较细化的网格，从而得到更大的自由度 (DOF) 数。

🚨 本节将阐述一些更深入的功能，首次阅读时可以跳过以下步骤。要运行以下收敛性分析，建议使用至少具有 4GB 内存 (RAM) 的计算机。

计算最大 von Mises 应力

- 1 要研究扳手中的最大 von Mises 应力，在模型树的结果栏中，右键单击派生值节点并选择最大值 > 体最大值 **MAX**。

- 在体最大值设置窗口的选择栏下，选择手动，并在图形窗口中单击扳手将其选中，即域 1。我们只考虑扳手域中的值，而忽略螺栓中的值。
- 在表达式表的第一行，在表达式列中键入 `solid.mises`。要查找 von Mises 应力表达式，也可以单击替换表达式按钮 ，然后浏览到此变量。
- 在表达式表中，键入 MPa 作为单位。



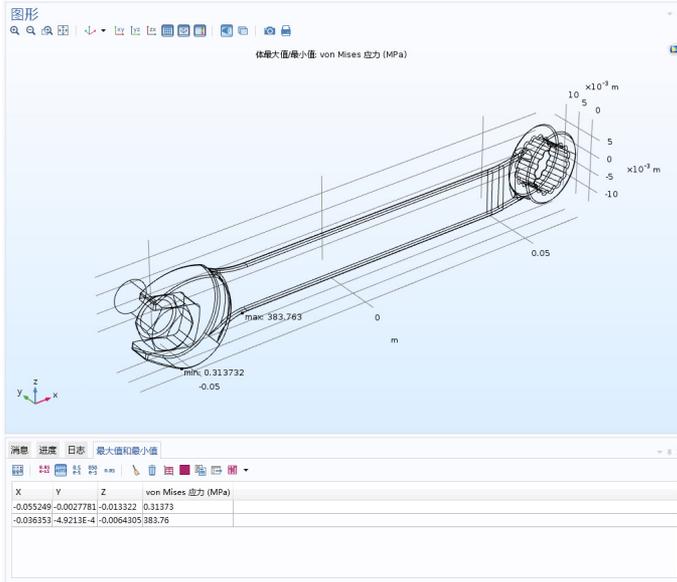
- 在体最大值的设置窗口中，单击计算以计算最大应力。结果将显示在“表格”窗口中，约为 375 MPa。
- 要查看获取最大值的位置，可以使用体最大值 / 最小值绘图。右键单击结果节点  并添加三维绘图组 。然后右键单击三维绘图组 3 节点 ，并选择更多绘图 > 体最大值 / 最小值 。



- 要在扳手而非螺栓中绘制值，右键单击体最大值 / 最小值  节点并选中选择，然后选择扳手域编号 1。
- 在体最大值 / 最小值设置窗口的表达式文本框中，键入 `solid.mises`。

9 在设置窗口的表达式栏下，从单位列表中选择 **MPa**（或在编辑框中输入 MPa）。

10 单击绘制按钮 。此类绘图可同时显示最大值和最小值的位置，并在下方表格中显示相应的坐标位置。



10

参数化网格

现在，我们将定义一个参数化扫描，在求解时连续细化网格大小，最终绘制最大 von Mises 应力 vs. 网格大小。首先，我们来定义用于控制网格密度的参数。

1 在模型开发器中，单击全局定义  下的参数 P_1 。

2 转到参数的设置窗口。在参数表中（或在表格下方的编辑框中）输入以下设置：

- 在名称列或编辑框中，输入 **hd**。此参数将用于在参数化扫描中控制单元大小。
- 在表达式列或编辑框中，输入 **1**。
- 在描述列或编辑框中，输入单元大小除数。

3 现在输入另一个参数，名称为 h_0 ，表达式为 0.01 ，描述为起始单元大小。该参数将用于定义参数化扫描开始时的单元大小。

设置
参数

参数

名称	表达式	值	描述
F	150[N]	150 N	作用力
hd	1	1	单元大小除数
h0	0.01	0.01	起始单元大小

3

4 在模型开发器的组件 1 下，单击网格 1 。在网格的设置窗口中，从序列类型列表中选择用户控制网格。

5 在网格 1 下，单击大小节点 。

6 在大小设置窗口的单元大小栏中，单击定制按钮。

单元大小参数

最大单元大小:

m

最小单元大小:

m

最大单元增长率:

曲率因子:

狭窄区域分辨率:

6

定位到单元大小参数栏：

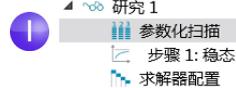
- 在最大单元大小框中输入 h_0/hd 。
- 在最小单元大小框中输入 $h_0/(4 \cdot hd)$ 。
- 在“最大单元增长率”框中输入 1.3 。
- 在“曲率因子”框中输入 0.1 。
- 在“狭窄区域分辨率”框中输入 0.2 。

有关单元大小参数的更多信息，请参见第 77 页。

参数化扫描和求解器设置

接下来，添加参数 hd 的参数化扫描。

1 在模型开发器中，右键单击研究 1 并选择参数化扫描 。参数化扫描节点将添加到模型开发器序列中。



2 在参数化扫描的设置窗口中，在研究设置栏的表格下单击添加按钮 。从表格的参数名称列表中选择 hd 。

- 3 输入要扫描的**参数值范围**。单击**范围**  按钮，并在**范围**对话框中输入值。在**起始框**中输入 1，在**步长框**中输入 1，并在**停止框**中输入 6。单击**替换**。**参数值列表**此时将显示 `range(1,1,6)`。

上述设置可确保随着扫描的进行，参数 `hd` 的值会增大，而最大和最小单元大小会减小。

有关定义参数化扫描的更多信息，请参见第 128 页。

对于 `hd` 的最大值，自由度数将超过 100 万。因此，我们将切换为内存效率更高的迭代求解器。

- 4 在**研究 1 > 求解器配置 > 解 1** 下，展开**稳态求解器 1** 节点 ，然后右键单击**建议的迭代求解器**  并选择**启用**。通常，选择迭代求解器选项可减少内存使用量，但求解器设置需要针对特定的物理场进行定制，以实现高效计算。
- 5 在**建议的迭代求解器设置窗口**的**常规**栏下，将**预处理**改为**右**。（这是一个低级别求解器选项，在本例中，可在某些情况下抑制警告消息。不过，此设置不影响求得的解。预处理是一种数学变换，用于准备有限元方程组以使用迭代求解器。）
- 6 单击**研究 1** 节点并选择**计算** ，该选项位于**设置**窗口，也可以右键单击该节点进行选择。还可以在功能区的主屏幕或**研究**选项卡中单击**计算**。计算过程将持续几分钟（具体取决于计算机硬件），内存使用量约为 4 GB。



结果分析

最后一步，在“表格”中显示最大 von Mises 应力，从而分析参数化扫描的结果。

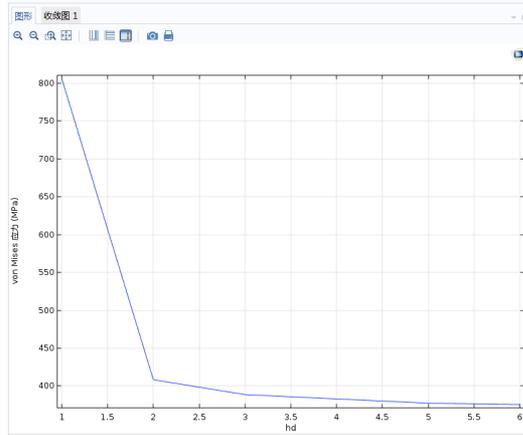
- 1 在“模型开发器”的**结果 > 派生值**下，选择**体最大值 1** 节点 **MAX**。

参数化扫描的解存储在名为**研究 1/ 参数化解 1**的数据集中。现在，根据需要更改**体最大值**设置：

- 2 在体最大值的设置窗口中，将数据集更改为研究 1/ 参数化解 1。
- 3 在体最大值的设置窗口顶部，单击**计算**按钮旁边的箭头，并选择在新表格中进行计算。计算过程约为 20 秒左右。
- 4 要在表格中绘制结果，单击表格窗口顶部的**表图**  按钮。

hd	von Mises 应力 (MPa)
1.0000	806.26
2.0000	408.35
3.0000	388.68
4.0000	382.98
5.0000	377.35
6.0000	375.45

4



我们更希望绘制最大值 vs. 自由度数。可以使用内置变量 `numberofdofs` 来实现。

- 5 右键单击派生值节点  并选择**全局计算** 。
- 6 在全局计算的设置窗口中，将数据集更改为研究 1/ 参数化解 1。
- 7 在表达式框中输入 `numberofdofs`。

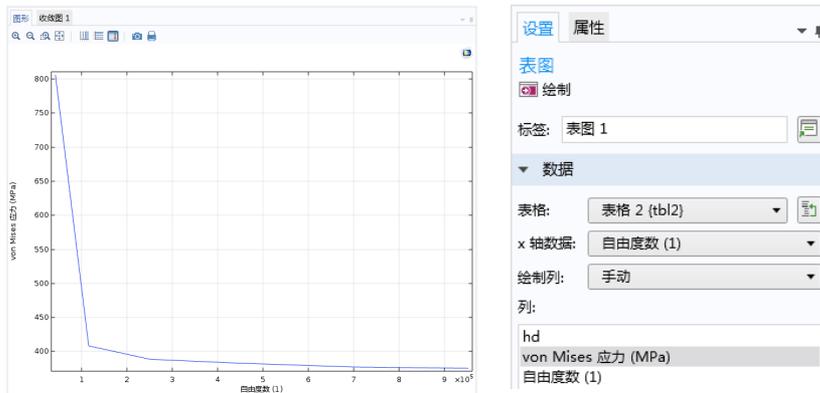


您可以键入变量名称的前几个字符，然后使用键盘快捷键 `Ctrl+/` 从可用变量列表中获取变量建议。

- 8 在全局计算的设置窗口中，单击**计算**按钮旁边的箭头，并选择相应的选项以在**表格 2** 中计算。这样可以在先前计算的数据旁显示每个参数的自由度数。

此收敛性分析表明，扳手手柄中计算得到的最大 von Mises 应力值将从约含 40,000 个自由度的网格对应的高初始值减少为约含 1,000,000 个自由度的网格对应的 375 MPa。该分析还表明，当自由度数约为 500,000 时，得到的结果与 1,000,000 个自由度的精度基本相同。

下图显示表图及关联的表图设置窗口。



请注意，根据您运行的 COMSOL Multiphysics 版本，上述值可能因为网格剖分算法生成的单元数的变化而略有不同。

扳手教程到此结束。

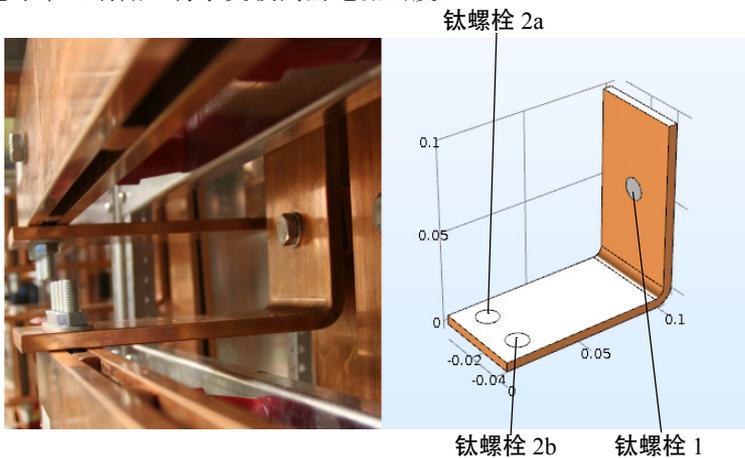
示例 2：母线板 - 多物理场模型

母线板焦耳热

本教程演示如何在 COMSOL Multiphysics 中使用“模型开发器”进行多物理场建模。您将学习如何使用众多预配置的多物理场组合中的一种，以及后续如何添加最初不包含在分析中的物理现象效应。最后，您将构建一个真实的多物理场模型。

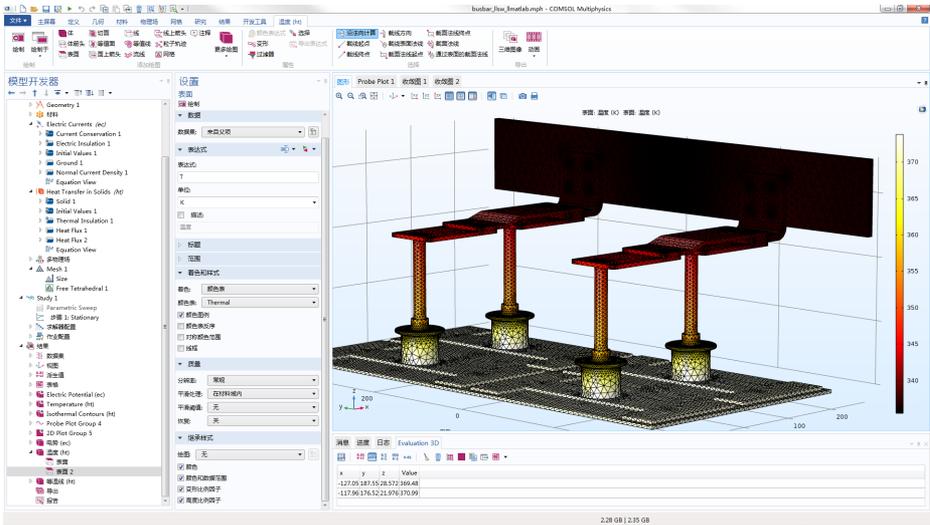
要创建的模型可以分析在工业设置中用于传导大量直流电的母线板（请见下图）。当电流从母线板的螺栓 1 传导至螺栓 2a 和 2b 时，会由于电阻损耗而产生热，即焦耳热现象。母线板由铜制成，而螺栓则为钛合金材质。母线板螺栓通常由钢制成，但在本例中，我们假定一个强腐蚀性环境。因此选择了钛合金。

在正常工作条件下，电流主要在铜内传导。然而，本例中演示的则是母线板中由螺栓引起的、并不希望产生的电流载荷。材料不同这一事实非常重要，因为钛的电导率比铜低，将承受较高的电流密度。



仿真目的是精确计算母线板中产生的热量。掌握了基本的多物理场现象后，您将可以开始研究母线板中生成结构应力和应变的热膨胀，以及气流的冷却效应。

焦耳热效应通过电流和能量守恒定律描述。求解后，将通过这两个守恒定律分别得到温度场和电场。所有表面（除螺栓接触表面以外）均通过母线板周围的空气自然对流进行冷却。您可以假定螺栓外露部分不会导致设备的冷却或加热。右上角垂直螺栓表面的电势为 20 mV，而下方螺栓的两个水平表面的电势为 0 V。这相当于在此类母线板中产生相对较高且有潜在危险的载荷。“AC/DC 模块”提供了更高级的边界条件用于电磁学分析，例如，可以给出边界上的总电流大小。一些附加产品（包括“AC/DC 模块”和一些 CAD LiveLink™ 产品）中提供了更高级的模型，即在一个装配中包含多个母线板，如下图所示。



母线板模型概述

本教程涵盖更深入的高级主题，用于显示 COMSOL Multiphysics 提供的众多选项中的一部分。涵盖以下主题：

- 第 98 页的“参数、函数、变量和耦合”，介绍如何定义函数和组件耦合。
- 第 102 页的“材料属性和材料库”，介绍如何定制材料，并将其添加到您自己的材料库。

- 第 104 页的“添加网格”，介绍如何添加并定义两种不同的网格，然后在“图形”窗口中进行比较。
- 第 106 页的“添加物理场”，介绍如何向母线板模型添加“固体力学”和“层流”，从而探索各种多物理场功能。
- 第 128 页的“参数化扫描”，介绍如何使用参数来改变母线板宽度，然后对一系列参数值进行求解。得到的结果是根据宽度变化绘制的平均温度图。
- 第 140 页的“并行计算”，概括介绍如何基于集群进行求解。
- 第 143 页的“COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器”，介绍如何使用 COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器操作模式。

模型向导

- 1 双击桌面上的 COMSOL Multiphysics 图标以打开软件。

软件打开后，单击**模型向导**按钮。也可以随时从**文件菜单**中选择**新建**来启动“模型向导”。然后选择**模型向导**。



- 2 在**选择空间维度**窗口中，单击**三维**。



3 在选择物理场窗口中，展开传热 > 电磁热。然后，右键单击焦耳热 并选择添加物理场。单击研究 按钮。也可以双击或单击添加按钮来添加物理场。

（添加物理场的另一种方式是打开添加物理场窗口，方法是在“模型开发器”中右键单击组件节点，然后选择添加物理场。）

请注意，您的物理场列表所含的项可能更少，具体取决于安装的附加模块。右图显示的是安装了所有附加模块时的物理场列表。



4 在**选择研究**窗口中，单击以选择**稳态** 研究类型。

单击**完成**按钮。

选择**稳态**研究意味着在母线板与周围环境达到热平衡时，对其**稳态**温度进行求解。

预配置的研究包含适合所选物理场接口组合（本例中为**焦耳热**）的求解器和方程设置。

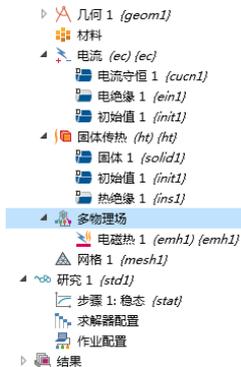
从**定制研究**分支 中所做的任何选择均需手动调整。

请注意，您的研究列表中的研究类型可能更少，具体取决于安装的附加模块。

选择研究



! 物理场接口是针对特定物理领域的用户界面，用于定义方程以及有关网格生成、求解器、可视化和结果的设置。多物理场接口是物理场接口与多物理场耦合的结合体。**焦耳热**多物理场接口由两个物理场接口组成：**电流**和**固体传热**，并与“多物理场”分支中显示的**电磁热**进行多物理场耦合。这种耦合物理场的方法非常灵活，您可以使用每个相关物理场接口的所有功能进行多物理场耦合分析。



全局定义

为节省时间，建议您从文件加载几何。随后便可以跳到第 62 页的“几何”。

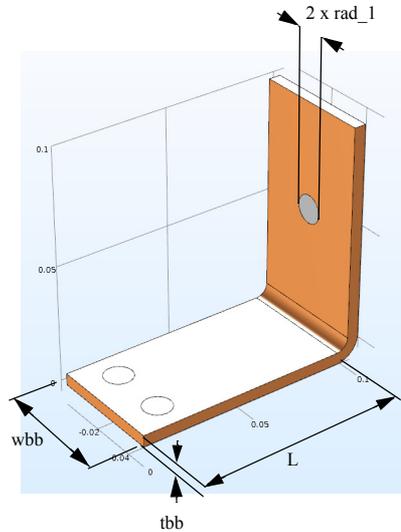
另一方面，如果您要自己绘制几何，可在**全局定义**节点中定义参数。首先，完成以下步骤 1 到 3，定义模型的参数列表。然后，完成步骤 4 并跳到第 146 页的“附录 A - 构建几何”一节。

“模型开发器”中的**全局定义**节点  可存储适用于全局范围的**参数、变量及函数**。模型树可以同时包含多个模型组件，全局范围的定义可用于所有组件。在此特例中，只有一个**组件**节点会使用参数。如果您希望将范围限制为仅针对这一单个组件，可以直接在相应**组件**节点下的**定义子**节点中定义**变量和函数**。不过，不能在此定义任何**参数**，因为在全局定义下定义的**参数**始终是全局性的。

由于本例稍后会运行几何的参数化研究，因此首先要使用参数来定义该几何。在这一步中，输入以下参数：母线板较低部分的长度 L 、钛螺栓半径 rad_1 、母线板厚度 tbb 及设备宽度 wbb 。

此外，还需添加以下参数：控制网格的参数 mh 、自然对流冷却的传热系数 htc 及整个母线板的电压值 V_{tot} 。

- 1 在**全局定义**  节点下选择**参数** p_1 。在**参数表**中，单击**名称**下的第一行并输入 L 。
- 2 单击**表达式**下的第一行，并输入 L 的值 $9[cm]$ 。可以在方括号内输入单位。



- 3 根据以下参数列表继续添加其他参数：**rad_1**、**tbb**、**wbb**、**mh**、**htc** 及 **Vtot**。如果希望与他人分享模型并方便您自己后续参考，建议输入变量的描述。

参数			
名称	表达式	值	描述
L	9[cm]	0.09 m	Length
rad_1	6[mm]	0.006 m	Bolt radius
tbb	5[mm]	0.005 m	Thickness
wbb	5[cm]	0.05 m	Width
mh	3[mm]	0.003 m	Maximum element size
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m ² ·K)	Heat transfer coefficient
Vtot	20[mV]	0.02 V	Applied voltage

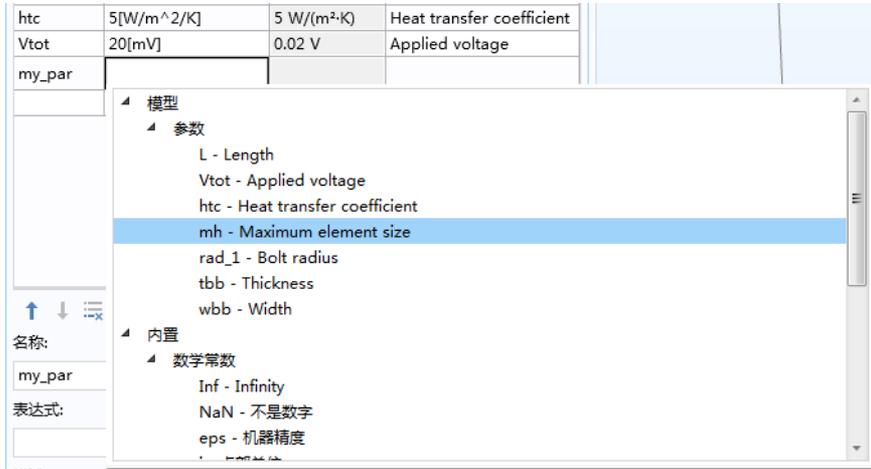
单击“快速访问工具栏”中的保存按钮  并将模型命名为 **busbar.mph**，或使用相应的文件菜单选项。然后转到第 146 页的“附录 A - 构建几何”。

自动完成与查找参数和变量

模型树包含许多参数和变量。您可以使用自动完成和查找工具更方便地进行查找，如下所述。

自动完成

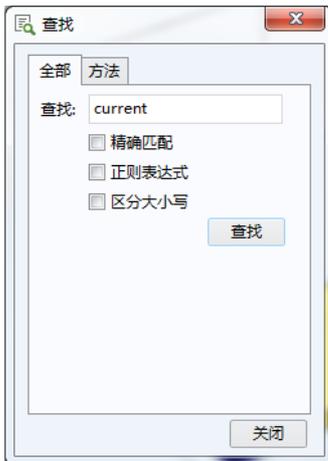
可以使用 Ctrl+/ 自动完成参数和变量名称。例如，如果您在参数表中单击空的表达式框并按 Ctrl+/, 将得到一个参数和变量列表，如下图所示。



在“模型开发器”的其他编辑框中也具有此功能。

查找

要在模型树中查找参数和变量，可在快速访问工具栏中单击查找按钮，也可以使用键盘快捷键 Ctrl+F，打开查找窗口。



搜索结果显示在**查找结果**窗口中，如下方的完整母线板模型图所示。



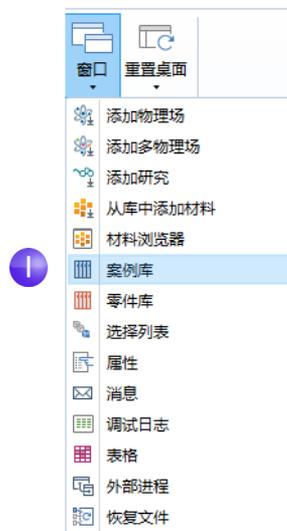
节点	类型	文本
Electric Currents (ec) (ec)	节点	Electric Currents
Current Conservation 1 {cucn1}	节点	Current Conservation 1
Electromagnetic Heating 1 (emh1) (emh1)	设置	Electric Currents (ec) (ec)
Stationary (stat)	表格单元格	Electric Currents
Current Density (pg4)	节点	Current Density
Surface 1 {surf1}	设置	Current density norm

可以双击此窗口中的任意行来打开相应的**设置**窗口。

几何

本节描述如何从“案例库”打开几何。物理场、研究、参数和几何等均包含在要打开的模型文件中。

- 1 从主屏幕选项卡的**窗口**下拉菜单中，选择**案例库**。



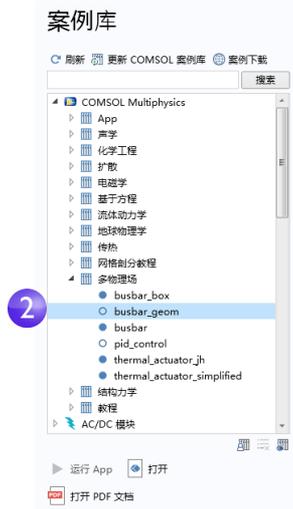
2 在案例库树的 **COMSOL Multiphysics** > 多物理场下，选择 **busbar geom**。

要打开文件，可执行以下操作：

- 双击名称
- 右键单击并从菜单中选择一个选项
- 单击目录树下方的一个按钮

如果提示保存 **Untitled.mph**，选择否。

该文件中的几何已参数化。在接下来的几步中，我们会试验对宽度参数 **wbb** 使用不同的值。



3 在全局定义  下，单击参数节点 P_1 。

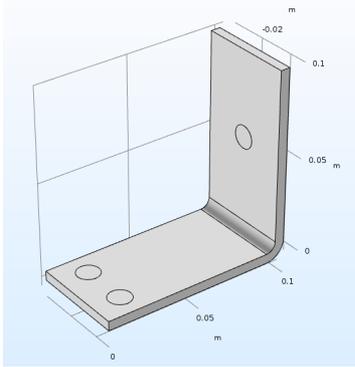
在参数的“设置”窗口中，单击 **wbb** 参数的表达式列，然后输入 **10[cm]**，更改母线板的宽度值。



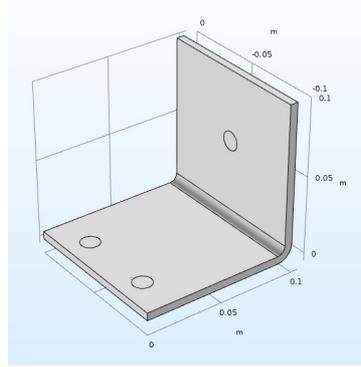
4 在模型开发器的组件 **1** > 几何 **1** 下，单击形成联合体节点 ，然后单击设置窗口中的全部构建按钮 ，返回几何序列。也可以使用功能区，在主屏幕选项卡的几何组中单击全部构建。



5 在图形工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮，可以在图形窗口中看到更宽的母线板。



wbb = 5cm



wbb = 10cm

6 在图形窗口中尝试操作几何：

- 要旋转母线板，在图形窗口的任意位置单击并拖动指针。
- 要进行移动，右键单击并拖动。
- 要放大和缩小，单击并按住鼠标滚轮的同时进行拖动。
- 要返回原始位置，单击工具栏中的**切换到默认三维视图**按钮.



7 返回参数表，并将 wbb 的值改回 5[cm]。

8 在模型开发器中，单击**形成联合体**节点，然后单击**全部构建**按钮，重新运行几何序列。

9 在图形工具栏中，单击**缩放到窗口大小**按钮.

7

参数		
名称	表达式	值
L	9[cm]	0.09 m
rad_1	6[mm]	0.006 m
tbb	5[mm]	0.005 m
wbb	5[cm]	0.1 m
mh	3[mm]	0.003 m
htc	5[W/m ² /K]	5 W/(m ² ·K)
Vtot	20[mV]	0.02 V

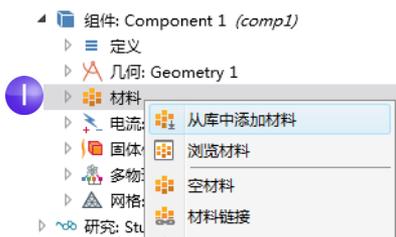
- 10 如果是您自己构建的几何，便可以使用 `busbar.mph` 文件，但如果是从“案例库”打开的文件，则从“文件”菜单中选择**另存为**，并将模型重命名为 `busbar.mph`。

创建或导入几何后，接下来定义材料。

材料

材料节点  存储了**组件节点**中所有物理场和几何域的材料属性。母线板由铜制成，而螺栓则为钛合金材质。这两种材料都可从**内置材料**数据库中获取。

- 1 在**模型开发器**中，右键单击**组件 1** > **材料** ，然后选择**从库中添加材料** 。默认情况下，该窗口在桌面右侧打开。可通过单击窗口标题并将其拖动到新位置来移动窗口。在拖动窗口时，您将看到多个停靠选项。

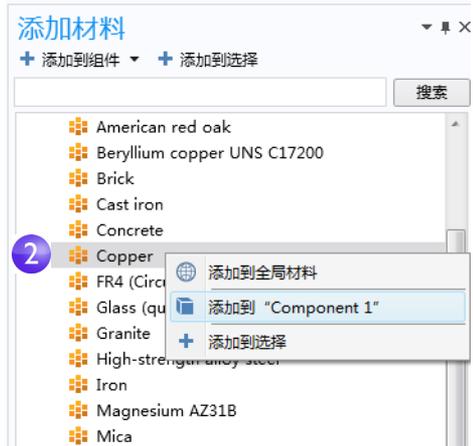


-  如果在未定义材料的情况下尝试求解，**材料节点**的左下角将显示一个红色 \times ，我们将在接下来的步骤中执行这一操作。

2 在添加材料窗口中，展开内置材料文件夹并定位到 **Copper**。右键单击 **Copper** 并选择添加到组件 1。也可以双击完成此操作。

Copper 节点会添加到模型开发器中。

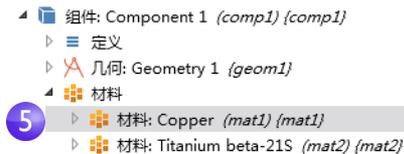
3 在添加材料窗口的内置材料文件夹中，滚动鼠标找到 **Titanium beta-21S**。右键单击并选择添加到组件 1。



4 在模型开发器中，折叠几何 1 节点，以获取模型概览。



5 在材料节点下，单击 **Copper**。



6 在材料的设置窗口中，检查材料属性明细栏。

属性	变量	值	单位	属性组
<input checked="" type="checkbox"/> 电导率	sigma_iso ;...	5.998e7[S/m]	S/m	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 恒压热容	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 相对介电常数	epsilon_r ;...	1	1	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 密度	rho	8960[kg/m^3]	kg/m^3	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 导热系数	k_iso ; kii =...	400[W/(m*K)]	W/(m*K)	基本
相对磁导率	mu_r_iso ; m...	1	1	基本
热膨胀系数	alpha_iso ;...	17e-6[1/K]	1/K	基本
杨氏模量	E	110e9[Pa]	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	0.35	1	杨氏模量和泊松比
参考电阻率	rho0	1.72e-8[ohm*m]	Ω·m	线性电阻率
电阻率温度系数	alpha	0.0039[1/K]	1/K	线性电阻率
参考温度	Tref	298[K]	K	线性电阻率

材料属性明细栏包含有关模型的材料属性使用的有用信息。物理场需要且材料中提供的属性带有绿色复选标记 。物理场需要但材料中缺少的属性则带有警告符号 。材料中提供但模型未使用的属性没有标记。

 上表中的热膨胀系数、杨氏模量和泊松比暂未使用，但稍后在模型中添加热致应力和应变时需要这些属性。

由于首先添加了铜材料，默认情况下，所有零件均指派为铜材料。下一步，将为螺栓指派钛属性，以替代指派给这些零件的铜材料。

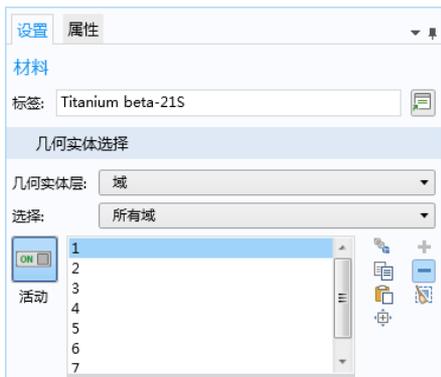
7 在模型开发器中，单击 **Titanium beta-21S** 。

- 组件: Component 1 (*comp1*) {*comp1*}
 - 定义
 - 几何: Geometry 1 (*geom1*)
 - 材料
 - 材料: Copper (*mat1*) {*mat1*}
 - 材料: Titanium beta-21S (*mat2*) {*mat2*}**
 - 电流: Electric Currents (*ec*) {*ec*}

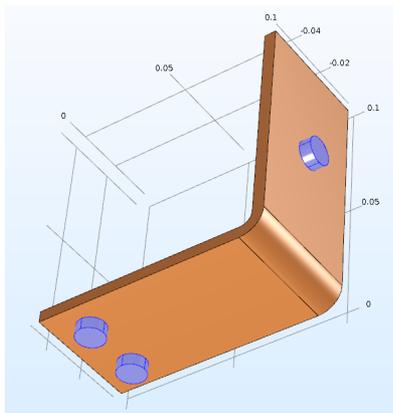
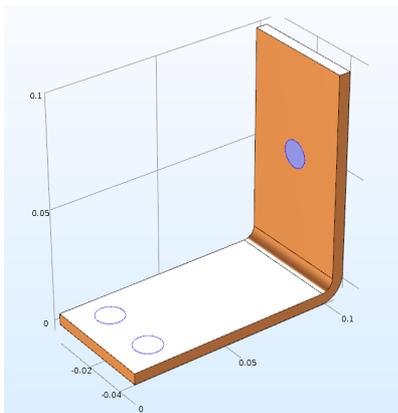
8 从选择列表中选择**所有域**，然后单击列表中的域**1**。现在，从选择列表中移除域**1**。

要从选择列表中移除域（或任意几何实体，如边界、边或点），可以使用以下两种方法之一：

- 在材料设置窗口的选择列表中，单击域**1**。然后单击从选择中移除按钮 ，或按键盘上的 Delete 键。
- 或者，在图形窗口中，单击域**1** 将其从选择列表中移除。



8 域 2、3、4、5、6 和 7 以蓝色突出显示。



- 9 要按材料的实际颜色对铜组件进行渲染，可从文件菜单中打开首选项窗口。然后，在图形和绘图窗口页面，选中显示材料颜色和纹理复选框。这也将启用其他材料的真实材料渲染。

- 9 在材料的设置窗口中，确保检查钛材料的材料属性明细栏。物理场使用的所有属性都应带有绿色复选标记 。

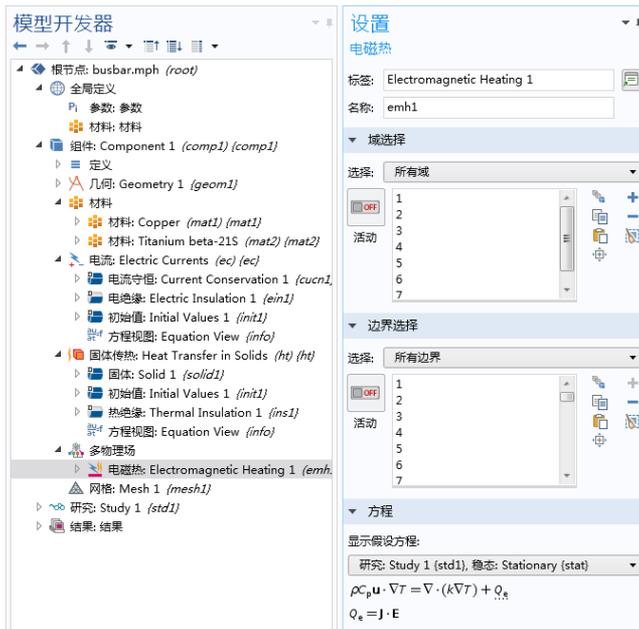


- 10 可以通过两种方式关闭添加材料窗口：单击右上角的关闭图标，或在功能区主屏幕选项卡的材料组中单击添加材料切换按钮



物理场和边界条件

接下来，我们将检查物理场的域设置，并设置传热问题和电流传导的边界条件。在**模型开发器**窗口中，检查**焦耳热**多物理场接口的默认物理场节点。首先，折叠**材料**节点。然后，单击**电流**、**固体传热**及**多物理场**节点旁边的箭头将其展开。



节点图标 (P) 左上角的 **D** 表示该节点为默认节点。

求解的方程显示在各个物理场节点**设置**窗口的“方程”栏中。

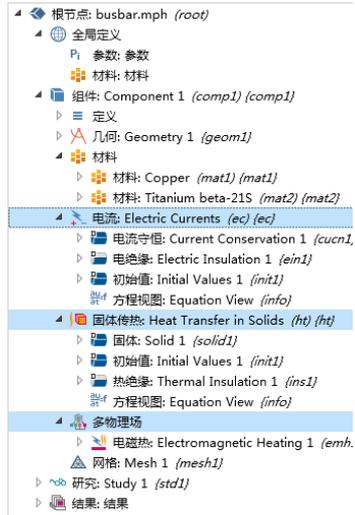
默认的方程形式继承自“模型向导”中添加的研究。对于**焦耳热**多物理场接口，方程用于求解温度和电势。

! 要在**设置**窗口中始终显示方程，可以单击**模型开发器**工具栏中的**显示**按钮 (☑)，然后选择**方程**栏，使该选项旁显示一个复选标记。

固体传热和电流节点分别包含热传导和电流传导设置。

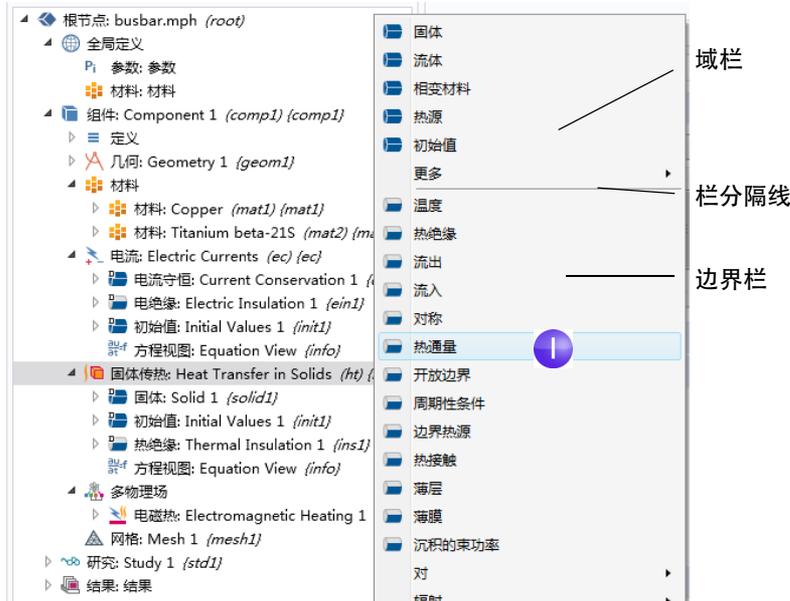
电流节点下的电流守恒节点表示域层的电流守恒，而电绝缘节点则包含电流的默认边界条件。

固体传热节点下的域层固体传热节点表示热量守恒，而热绝缘节点则包含固体传热的默认边界条件。焦耳热效应的热源在多物理场节点下的电磁热节点中设置。电流和固体传热接口中的初始值节点包含稳态问题中非线性求解器的初始猜测值和瞬态问题的初始条件。



现在，定义边界条件。

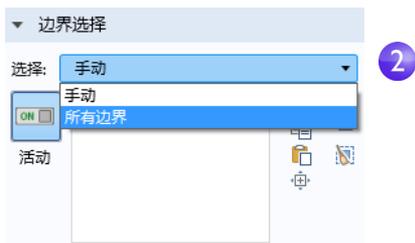
- 1 右键单击固体传热节点 。在上下文菜单的第二栏（边界  栏）选择热通量。



- 2 在热通量的设置窗口中，从选择列表中选择所有边界。

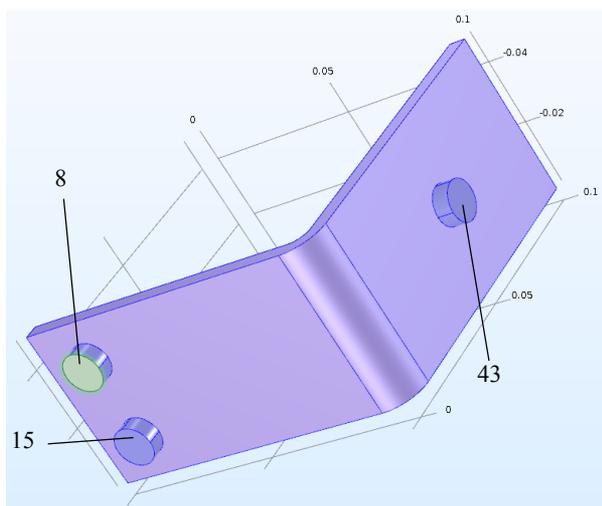
假设周围环境既不会加热也不会冷却圆形螺栓边界。

在下一步中，将从热通量选择列表中移除这些边界选择，使其保留固体传热接口的默认热绝缘边界条件。



- 3 旋转母线板以查看背面。移动鼠标指针，将其置于一个圆形钛螺栓表面上，使其以绿色突出显示。单击螺栓表面，从选择列表中移除该边界选择。重复该步骤，从选择列表中移除其他两个圆形螺栓表面。边界 8、15 和 43 已被移除。

- 3 再次确认：边界 8、15 和 43 已从“选择”列表中移除。



- 4 在热通量设置窗口的热通量栏中，单击对流热通量按钮。在传热系数框 h 中，输入 htc 。

此参数有两种输入方式：在第 59 页的“全局定义”中的参数表中输入或随几何导入。

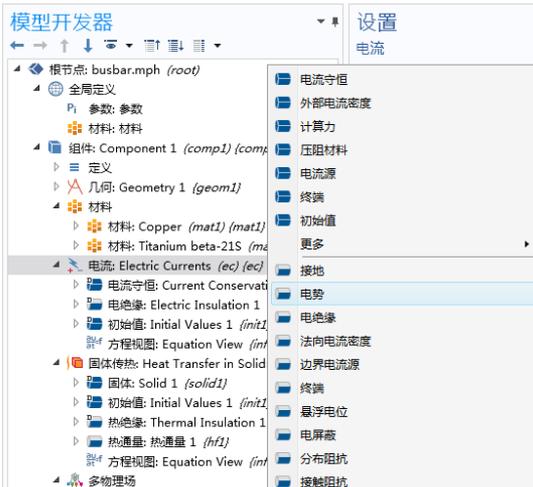
4



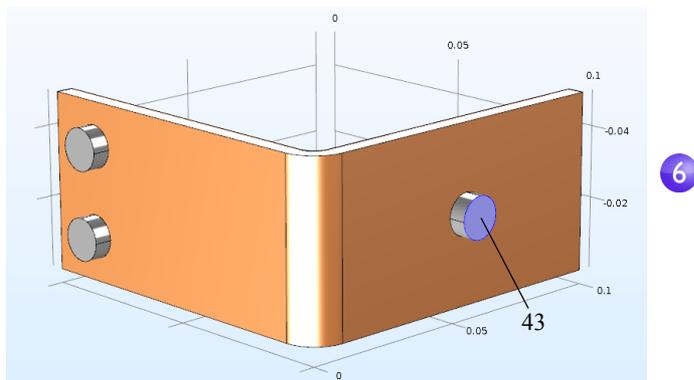
用于传热分析的更多高级边界条件通过“传热模块”提供。例如，包含以下功能：给出边界上的总沉积功率，或为常见自然对流场景（如水平或垂直壁）设置边界条件等。

我们将继续按照以下步骤来设置电流的边界条件：

- 5 在模型开发器中，右键单击电流节点 。在上下文菜单第二栏（边界栏），选择电势。电势 节点会添加到模型树中。

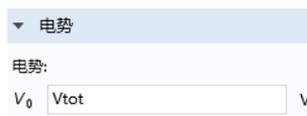


- 6 将鼠标指针移到单个钛螺栓的圆形面上，使其突出显示，然后单击将其（边界 43）添加到选择列表。



- 7 在电势设置窗口的电势框中，输入 V_{tot} 。

最后一步是将剩余的两个螺栓表面设为接地。



- 8 在模型开发器中，右键单击电流节点 。在上下文菜单的边界栏中选择接地。接地节点  会添加到模型树中。此时，模型树节点序列应与下图相符。

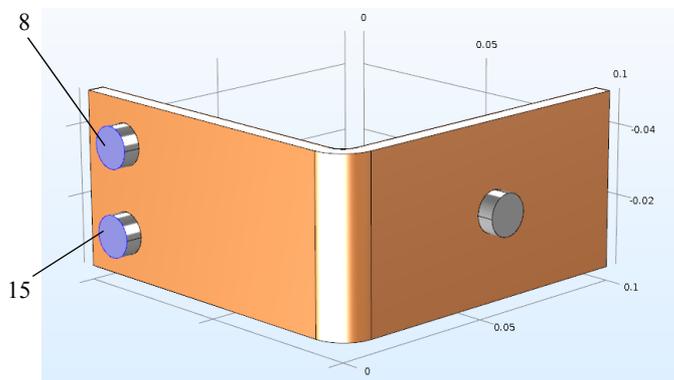


接地节点上显示的“警告”属性表明，其边界选择为空。下一步是选择边界。

9 在图形窗口中，单击余下的其中一个螺栓，将其添加到选择列表中。

9

再次确认：边界 8 和 15。



重复此步骤来添加最后一个螺栓。边界 8 和 15 已添加到接地边界条件的选择列表中。

10 在图形工具栏中，单击切换到默认三维视图按钮 。

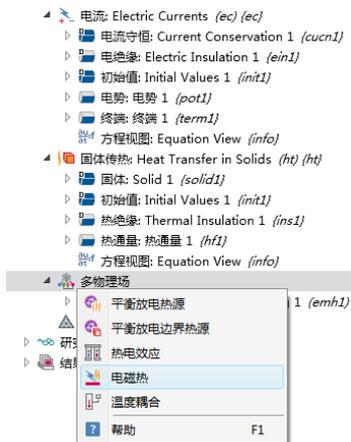


10

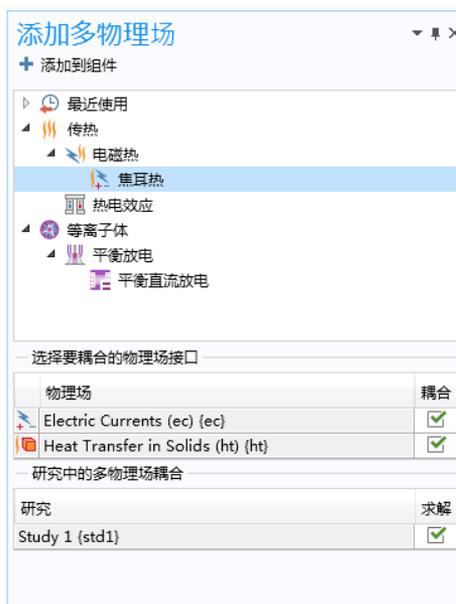
❗ “AC/DC 模块” 提供了更多用于电磁学分析的高级边界条件，例如，可以给出边界上的总电流大小。

手动组合物理场接口

除了使用预配置的**焦耳热**多物理场接口外，您也可以手动组合**电流**与**固体传热**接口。例如，可以先建立并求解**电流**模型，然后再添加**固体传热**。此时，可以右键单击**多物理场**节点来添加所需的多物理场耦合。



作为备选方案，也可以单击功能区**物理场**选项卡中的**添加多物理场**按钮，然后在**添加多物理场**窗口中选择建议的多物理场耦合。

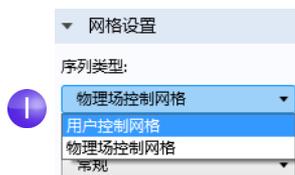


网格

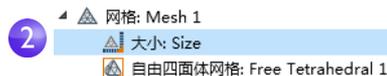
最简单的网格剖分方式是创建非结构化的四面体网格，非常适用于母线板模型。或者，您也可以创建多个网格剖分序列，如第 104 页的“添加网格”所示。

❗ 默认情况下，会创建物理场控制的网格。大多数情况下，可直接跳至研究节点来求解模型。在本练习中，我们将研究这些设置，以便参数化网格设置。

1 在模型开发器中，单击网格 1 节点 。
在网格的设置窗口中，从序列类型列表中选择用户控制网格。



2 在网格 1 下，单击大小节点 .



3 在大小设置窗口的单元大小栏中，单击定制按钮。

定位到单元大小参数栏：

- 在最大单元大小框中输入 mh。
请注意，mh 为 3 mm - 这是之前作为全局参数输入的值。引入参数 mh 后，可以通过该值来限制单元大小。



- 在**最小单元大小**框中输入 $mh-mh/3$ 。最小单元大小略小于最大单元大小。
- 在**曲率因子**框中输入 **0.2**。曲率因子可确定弯曲边界上的单元数；值越小，生成的网格越细化。

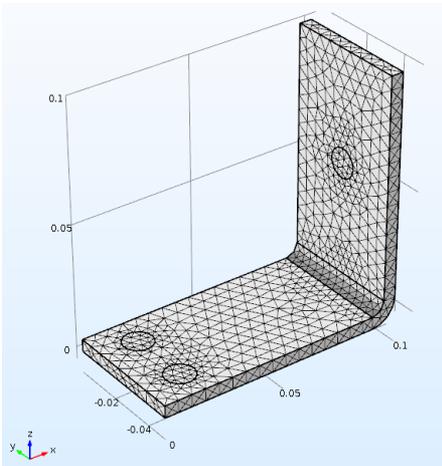
其他两个参数保持不变。

最大单元增长率可确定一个域上的单元从小到大的增长速率。该值越大，增长率越高。值为 **1** 时，不发生增长。

对于**狭窄区域分辨率**，通常值越大，得到的网格越细化。

大小节点  右上角的星号 (*) 表示该节点处于编辑状态。

4 单击大小设置窗口中的**全部构建**按钮 ，以创建如下图所示的网格：

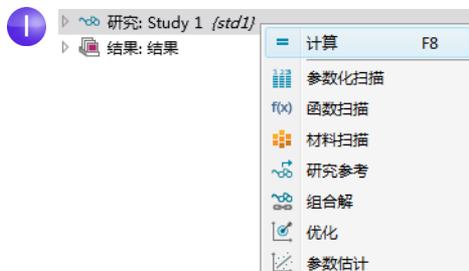


也可以在功能区**主屏幕**选项卡中单击**构建网格**。

研究

1 要运行仿真，在**模型开发器**中右键单击**研究 1**  并选择**计算** 。也可以按 F8 或单击功能区**主屏幕**选项卡中的**计算**。

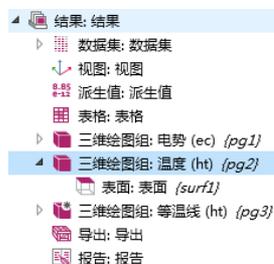
研究节点  会基于选定的物理场和研究类型自动定义仿真的解序列。在本例中，仿真仅需几秒钟便可完成求解。在求解过程中会生成两个**收敛图**，可通过**图形**窗口旁边的选项卡访问。这些绘图显示了**研究**中所用不同求解器算法的收敛进度。



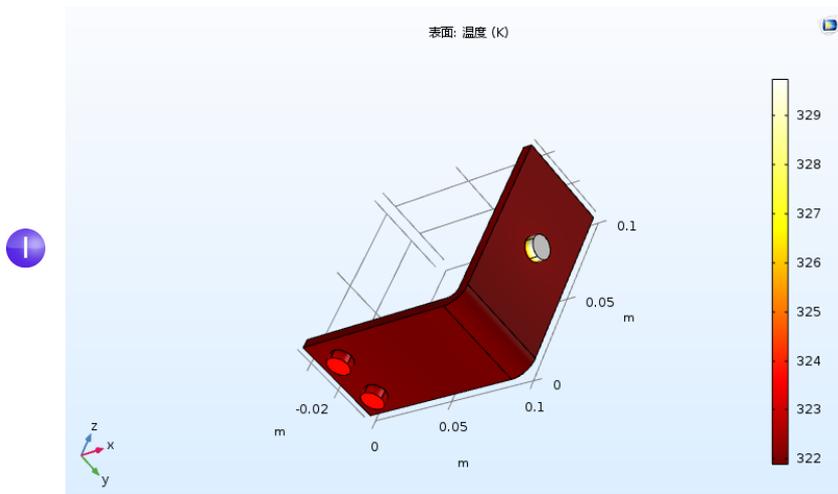
结果

默认情况下，会在**结果**节点下生成三个绘图组：**电势**的多切面图、**温度**的表面图以及包含**温度**等值面图的**等温线图**。

单击**结果** > **温度**  以在**图形**窗口中查看**温度**图。由于铜和钛的热导率较高，设备中的温差小于 10 K。顶部螺栓的温度变化最大，因为此处传导的电流是底部两个螺栓所传导电流的两倍。温度也远高于环境温度 293 K。



- 1 单击并拖动图形窗口中的图像，旋转母线板并查看其背面。



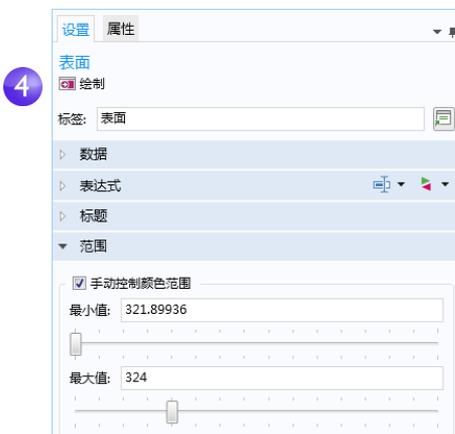
- 2 在图形工具栏中，单击切换到默认三维视图按钮 。

现在，可以手动设置颜色表范围，对铜零件上的温差进行可视化。

- 3 在模型树中展开结果 > 温度节点 ，然后单击表面节点 。

- 4 在表面的设置窗口中，单击范围展开该栏。选中手动控制颜色范围复选框，并在最大值框中输入 324（保留默认的最小值并替换默认的最大值）。在表面的

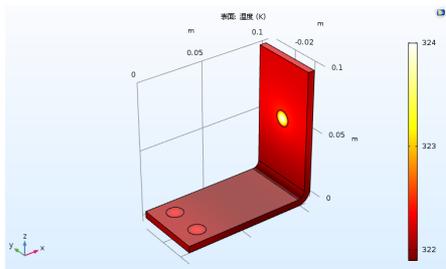
设置窗口中，单击绘制按钮 。



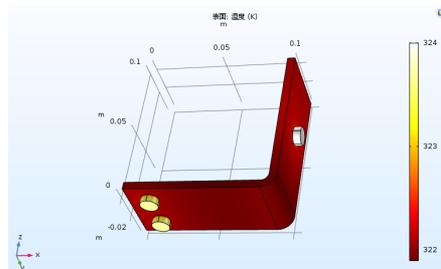
4

5 在图形工具栏中单击缩放到窗口大小按钮 ，查看更新的绘图。

6 在图形窗口中单击并拖动鼠标，旋转母线板并查看其背面。



5



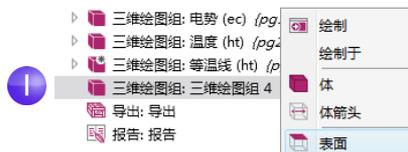
6

温度分布与下方两个钛螺栓之间的垂直镜像平面横向对称，该镜像平面穿过上方螺栓的中心。在这种情况下，该模型无需太多计算资源，您可以对整个几何建模。对于更复杂的模型，可以考虑使用对称来降低计算需求。

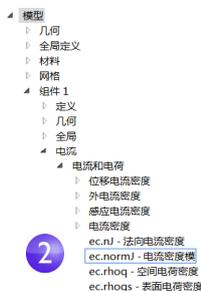
选择图形窗口工具栏中的切换到默认三维视图 。

然后，生成表面图来显示设备中的电流密度。

- 1 在模型开发器中，右键单击结果  并添加三维绘图组 。右键单击三维绘图组 4  并添加表面节点 。



- 2 在表面设置窗口的表达式栏下，单击替换表达式按钮 。转至模型 > 组件 1 > 电流 > 电流和电荷 > **ec.normJ - 电流密度模**，然后双击或按 Enter 进行选择。



ec.normJ 是电流密度矢量的幅值或绝对值的变量。如果您知道变量名称，也可在表达式框中键入 **ec.normJ**；此外，您也可以使用自动完成功能，即键入 **norm** 然后按 **Ctrl+I** 来获取变量名称建议。



- 3 单击绘制按钮 。

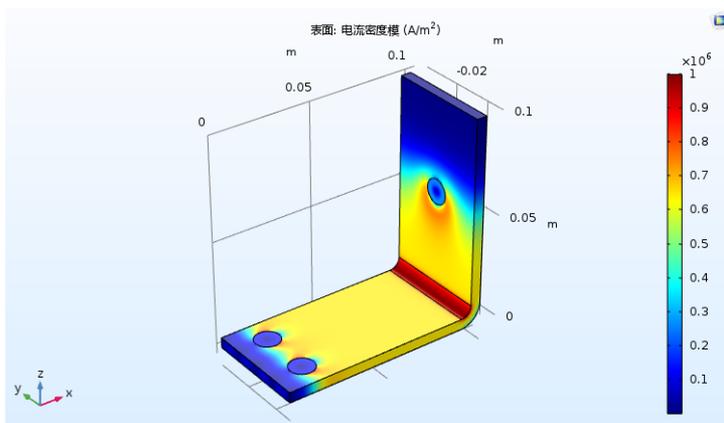
由于同螺栓接触的边上的电流密度较高，图形窗口中显示的绘图颜色几乎相同。下一步是手动更改颜色表范围，对电流密度分布进行可视化。

- 4 在表面“设置”窗口的范围栏下，选中手动控制颜色范围复选框。在最大值框中输入 $1e6$ 来替换默认值。

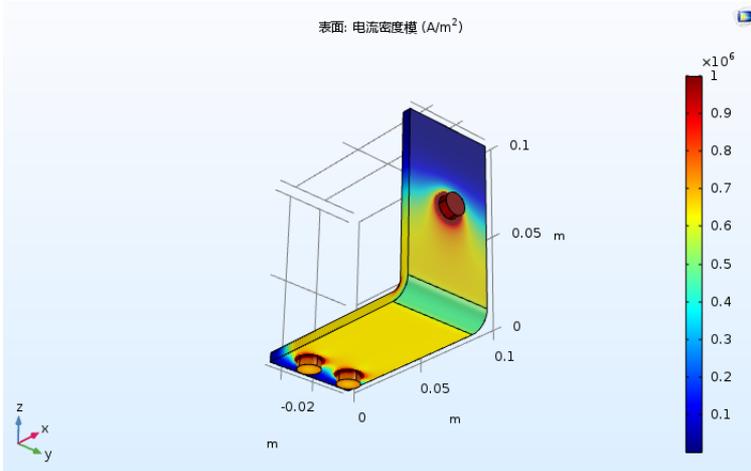


- 5 单击绘制按钮 。

结果绘图显示，电流通过母线板中 90 度弯曲的最短路径。请注意，螺栓外母线板的边几乎没有承载任何电流。



- 在图形窗口中单击并拖动母线板，查看其背面。继续旋转图像，查看每个螺栓接触表面周围的高电流密度。



6

完成后，单击图形工具栏中的切换到默认三维视图按钮 。

获取最高和最低温度

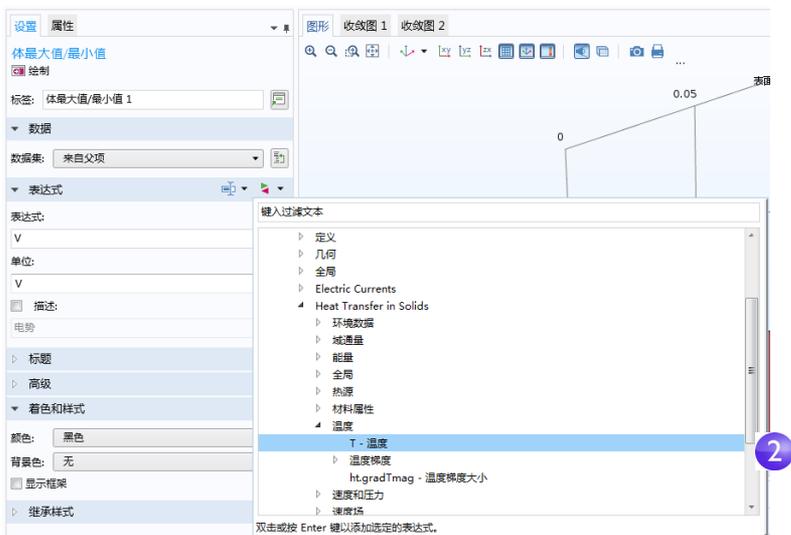
您可以轻松获取母线板中的最高和最低温度值及其在母线板中的位置。

- 右键单击结果 > 温度  并选择更多绘图 > 体最大值 / 最小值。

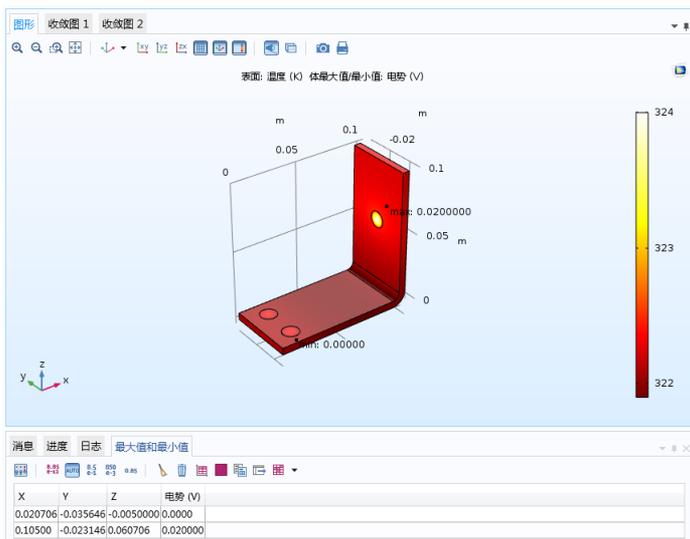


- 在体最大值 / 最小值设置窗口的表达式栏下，单击替换表达式按钮 。转至模型 > 组件 1 > 固体传热 > 温度 > T - 温度，然后双击或按 Enter 进行选择。还可以

在后处理变量树上的搜索框中搜索温度。单击绘制。

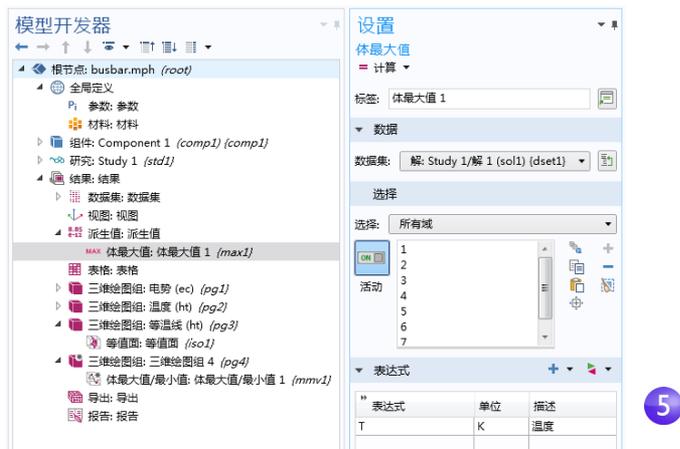


此时会在图形窗口中生成最大值和最小值绘图，并在**最大值和最小值**表中显示这些值及对应的位置。这些值根据您运行的版本可能会略有不同。对于较细化的网格，不论是哪个版本，得到的结果都相同。



除上述绘制最大值与最小值的方法外，还可以使用派生值节点获取纯数值输出。

- 3 在模型树的结果栏中，右键单击派生值  节点并选择最大值 > 体最大值 。
- 4 在体最大值设置窗口的选择栏下，选择所有域。
- 5 在表达式表的第一行为温度输入 T（除非自动填充），然后在设置窗口顶部单击计算。



表格 1 中会显示得到的最高温度值。



下一步，您将创建模型缩略图。

基于绘图创建模型图像

您可以基于任何解来创建在浏览模型文件时显示的图像。生成绘图后，在模型开发器的结果下单击相应的绘图节点。然后单击根节点，即模型树的第一个节点。在“根节点”设置窗口的缩略图栏下，单击从图形窗口设置。

软件还提供其他方式基于绘图创建图像。一种是单击图形窗口工具栏中的图像快照按钮  直接创建图像。也可以将图像节点  添加至导出节点来创建图像文件。右键单击感兴趣的绘图组，然后选择添加要导出的图像。



请确保在此阶段保存模型。此版本的模型 `busbar.mph` 将在接下来的几个教程中被重复使用并重命名。

开发 App

本节将简要介绍如何基于母线板模型创建 App，其中将包含专用于和母线板模型交互的用户界面，并包含长度、宽度及外加电压的输入框。输出结果为最高温度和温度图。

您将学习如何使用“新建表单”向导快速创建 App。“新建表单”向导用于创建包含用户界面组件的表单，这些组件称为表单对象。该向导可供您快速访问“App 开发器”中可用于创建 App 的所有表单对象的子集。在本例中，您将学习如何使用该向导来添加输入框、数值输出、图形及按钮。有关开发 App 的详细信息，请参阅《App 开发器简介》一书。

新建表单

- 1 要从“模型开发器”切换到“App 开发器”，单击功能区主屏幕选项卡最左侧的 App 开发器按钮。



2 要创建新表单，单击功能区中的**新建表单**按钮。

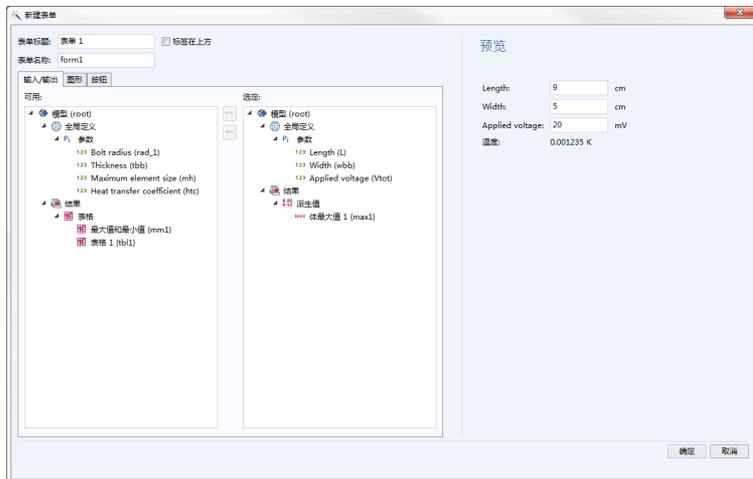


此时显示向导窗口。



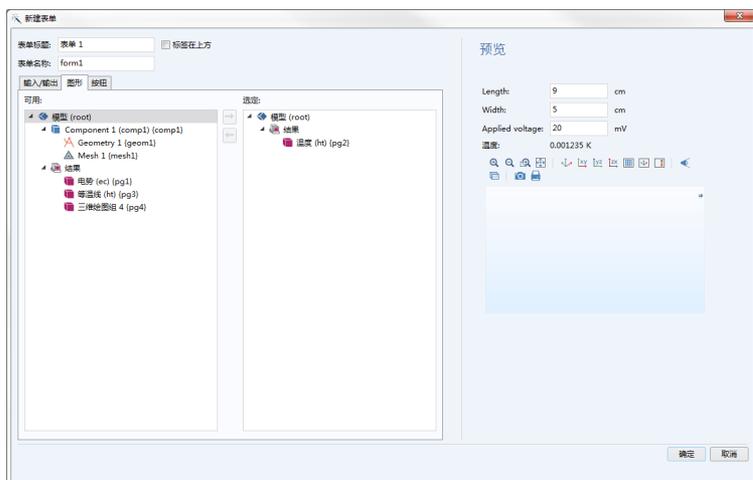
其中包含三个选项卡：**输入 / 输出**、**图形**和**按钮**。在**输入 / 输出**选项卡中，可以双击树中的节点，使其在 App 的用户界面中可用。对于此 App，我们将选择一些参数作为输入框，并选择最高温度作为输出。

- 3 双击以下每个参数: **Length (L)**、**Width (wbb)** 及 **Applied voltage (Vtot)**。此外, 双击派生值下的体最大值。

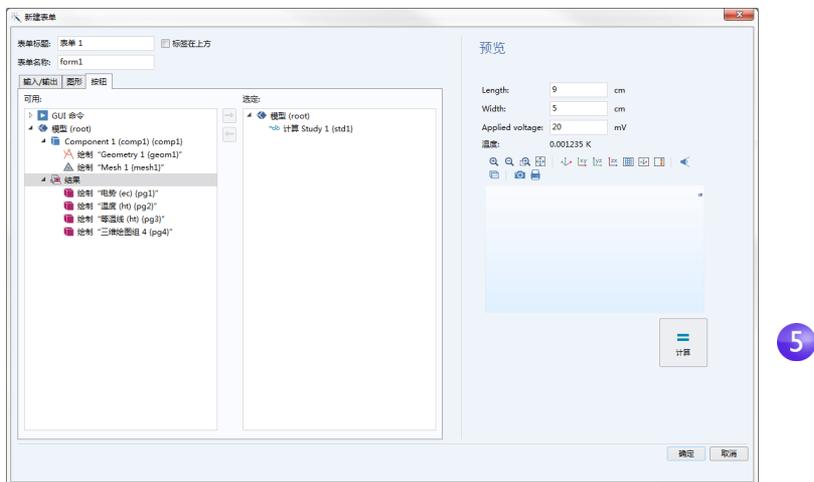


右侧的预览栏可显示用户界面布局。

- 4 单击向导中的图形选项卡, 然后双击温度图。预览区域将出现一个图形对象占位符。

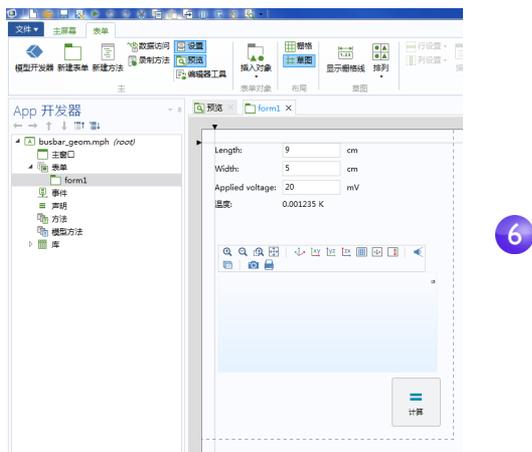


5 单击向导中的按钮选项卡，然后双击**计算研究 1**。该按钮此时显示在预览区域图形对象的下方。

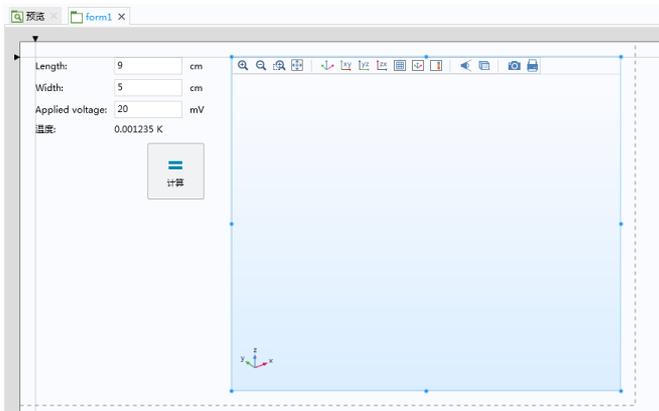


6 最后，单击**确定**以接受设置并关闭向导。

关闭“新建表单”向导后，会打开“表单编辑器”，可供您拖放表单对象并添加新的表单对象。



- 7 例如，通过将图形对象拖动到输入框的右侧，并将按钮直接置于输入框的下方，可以重新排列用户界面，如下图所示。蓝色指导线有助于对齐对象。

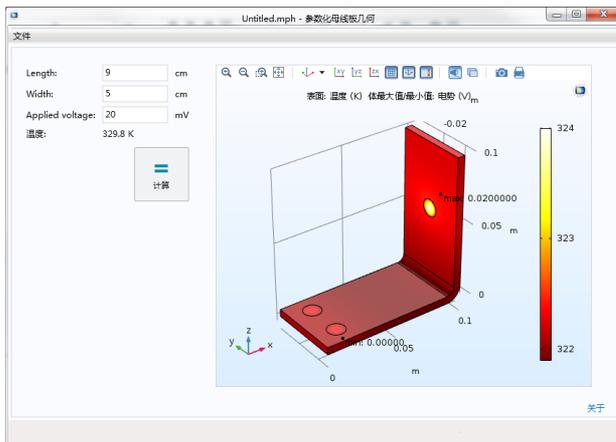


可以拖动蓝色控制点来放大图形对象。

- 8 可以单击功能区中的测试 App 对 App 进行测试。



此操作可创建 App 的运行时副本，可供您在开发 App 的过程中快速尝试不同的设计。



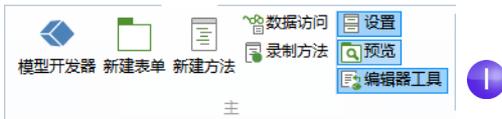
- 9 现在，尝试输入不同的 Length 值，然后单击计算。

添加按钮

您可能希望在开始计算之前先预览几何，这可以通过添加按钮来轻松实现。添加按钮的方式有两种。使用功能区中的**插入对象**菜单（如下图所示），或使用**编辑器工具**窗口。在本例中，我们使用第二种方法。



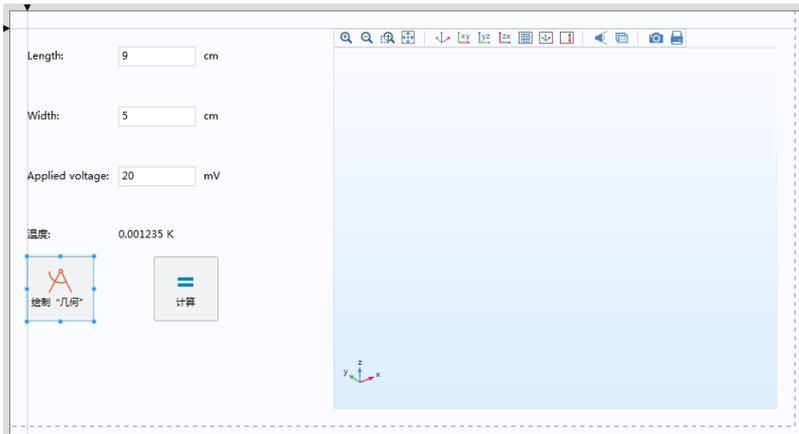
1 首先，通过选择功能区中的相应按钮来确保**编辑器工具**窗口可见。



2 在编辑器工具树中，右键单击几何节点并选择按钮。



3 将绘制几何按钮拖动到计算按钮左侧。



每个按钮都对应一个命令序列，用于控制按下该按钮时要执行的操作。命令序列在按钮的**设置**窗口中定义，可以双击该按钮来打**设置**窗口（如果尚未打开）。

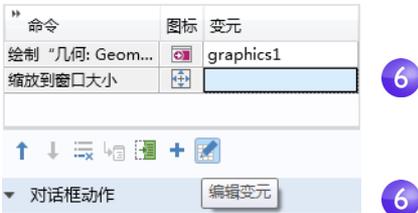
- 4 双击**绘制几何**按钮以查看其**设置**窗口。命令序列显示在**选择要运行的命令**栏中目录树的下方。



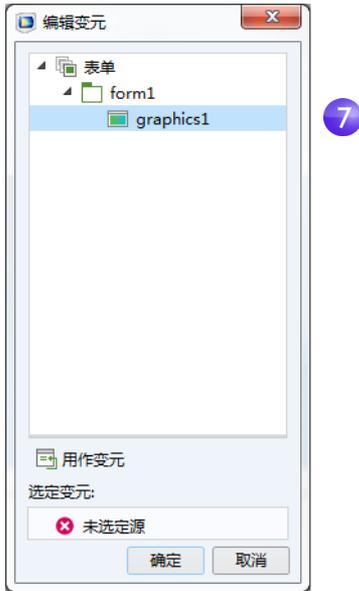
在本例中，**绘制几何**的命令序列包含一个**绘制几何**的命令。输入变元包含有关将几何绘图发送至哪个图形窗口的信息，本例中为图形对象 **graphics1**。

要自动调整轴设置，可以添加**缩放到窗口大小**命令。

- 5 在**选择要运行的命令**栏中，在 **GUI 命令 > 图形命令**下找到**缩放到窗口大小**命令。双击该命令将其添加到命令序列。
- 6 现在，为**缩放到窗口大小**命令创建输入变元。单击**缩放到窗口大小**旁的空白编辑框，然后单击**编辑变元**按钮。



7 将打开一个包含可用输入变元的对话框。选择 **form1** 下的 **graphics1**。



8 命令序列现在已完整。



9 为确保新的**绘制几何**按钮正常工作，可以单击功能区的**测试 App** 再次对该 App 进行测试。

方法

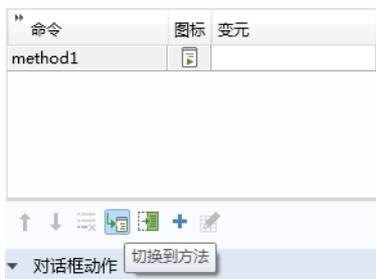
要执行命令序列可能无法实现的更高级操作，可以使用“方法编辑器”来编写代码，定义用户在执行单击按钮、选择菜单项等操作时要执行的操作。一种简单的“方法编辑器”入门方式是，将现有命令序列转换为一种方法。

- 1 再次找到或打开绘制几何按钮的设置窗口。单击命令序列下的转换成新方法按钮。



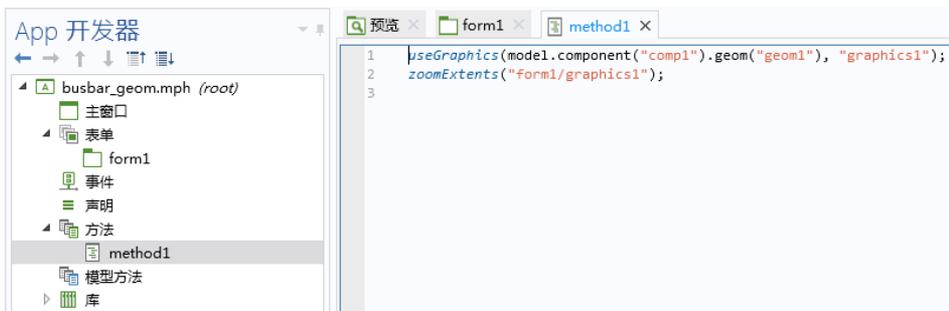
1

- 2 要在“方法编辑器”中打开此方法，单击命令序列下的切换到方法按钮。



2

“方法编辑器”现在会打开 **method1** 的代码，对应于先前命令序列中的绘制几何与缩放到窗口大小命令。



2

“App 开发器”提供了多个自动生成代码的工具。例如，除了将命令序列转换成方法外，还可以单击功能区中的**录制代码**。



此按钮可以为在 COMSOL Desktop 窗口中执行的每个操作生成代码。单击功能区中的**停止记录**，可停止录制并返回“方法编辑器”。

您可以录制并创建两种不同类型的方法：“App 方法”和“模型方法”。App 方法还可用于修改正在运行的 App 的模型。模型方法用于修改当前模型。您可以使用“方法编辑器”来编辑这两种方法。如需学习有关使用“表单编辑器”和“方法编辑器”的更多信息，请参阅《App 开发器简介》一书。本书还提供有关模型方法的更多信息。

母线板示例到此结束。要切换回“模型开发器”，单击功能区中的**模型开发器**按钮。



接下来的章节能加深您对目前为止已实施步骤的理解，并扩展仿真范围，包含了对诸如热膨胀和流体流动等其他效应的仿真。您可以在以下页面阅读这些附加主题：

- 第 98 页的“参数、函数、变量和耦合”
- 第 102 页的“材料属性和材料库”
- 第 104 页的“添加网格”
- 第 106 页的“添加物理场”
- 第 128 页的“参数化扫描”
- 第 140 页的“并行计算”
- 第 143 页的“COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器”
- 第 146 页的“附录 A - 构建几何”

高级主题

参数、函数、变量和耦合

本节将探讨如何使用参数、函数、变量及组件耦合。

全局定义和组件 > 定义节点包含的功能有助于准备模型输入、组件耦合以及组织仿真。在第 59 页的“全局定义”一节，您已使用该功能通过添加参数组织了模型输入。

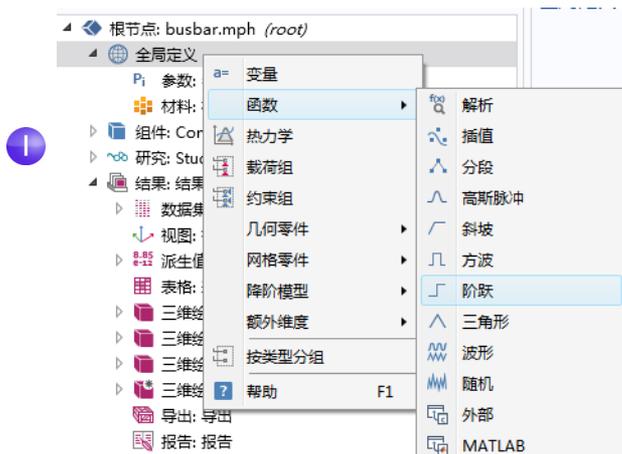
函数可用于**全局定义和组件 > 定义**，其中包含一系列预定义的函数模板，这在建立多物理场仿真时非常有用。例如，**阶跃**函数模板可以创建平滑的阶跃函数，用于定义不同类型的空间或时间过渡。

为阐明函数的使用方法，假设您希望在母线板模型中添加瞬态研究，该母线板上施加的电势会在 0.5 秒内从 0 V 升至 20 mV。为此，可以使用阶跃函数乘以参数 V_{tot} 。在本节中，您将在模型中添加一个在 0.5 秒内从 0 平滑上升至 1 的阶跃函数，从而了解如何定义并验证函数。

定义函数

在本节中，您可以继续使用在上一节创建的模型文件。如果文件 `busbar.mph` 尚未在桌面上打开，找到并打开该文件。

- 1 右键单击全局定义节点  并选择函数 > 阶跃 。

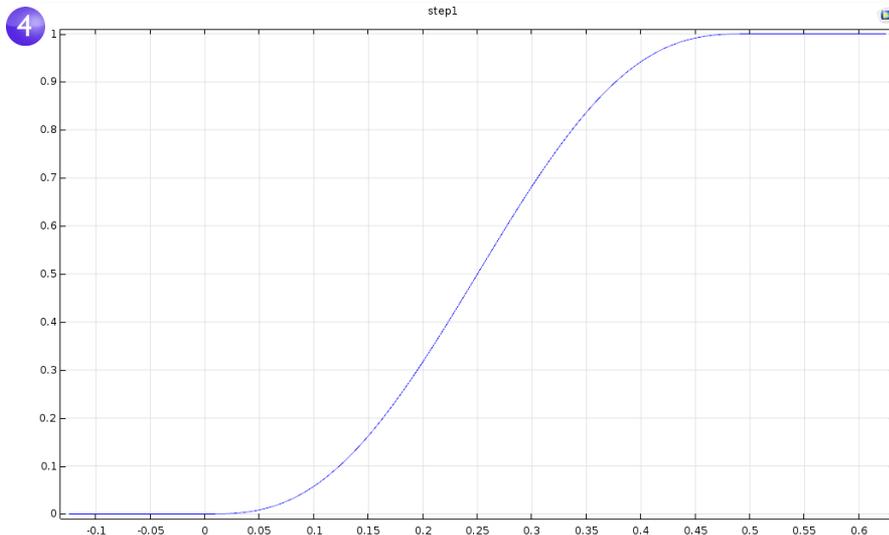


- 2 在阶跃设置窗口的位置框中，输入 0.25，设置值为 0.5 的阶跃中心的位置。



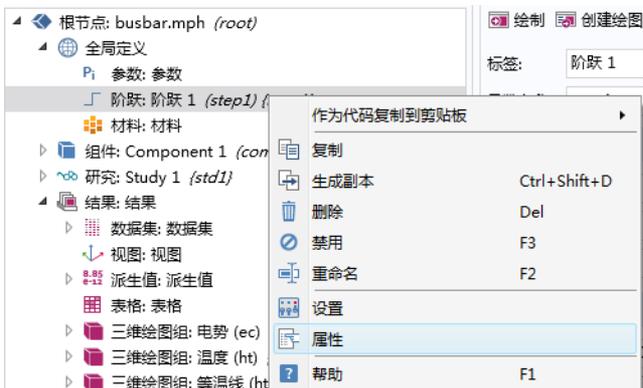
- 3 单击平滑展开该栏，并在过渡区大小框中输入 0.5，设置平滑间隔的宽度。保留默认连续导数阶数为 2。
- 4 在阶跃的设置窗口中，单击绘制按钮 。

如果得到的绘图与下图相符，说明您已正确定义该函数。

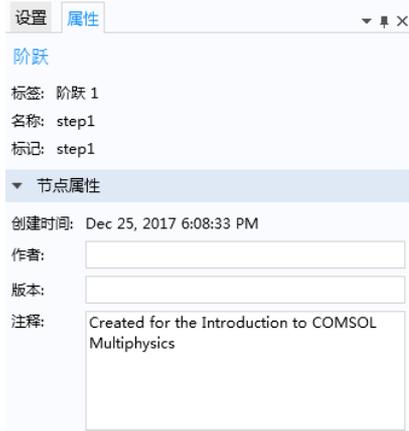


还可以添加注释和重命名函数，使描述信息更为具体。

5 右键单击模型开发器中的**阶跃 1**节点，并选择**属性**。



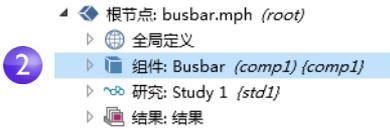
- 在属性窗口中，输入需要的任何信息。完成后，右键单击属性选项卡并选择关闭。



在本练习中，假设您希望引入另一个组件来表示通过钛螺栓连接至母线板的电气设备。

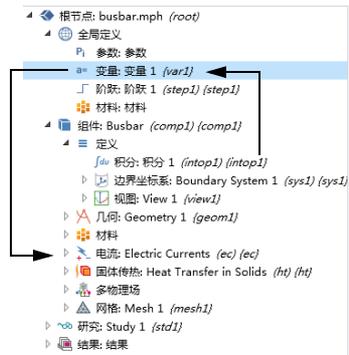
首先，重命名组件 1，指定它表示母线板。

- 右键单击组件 1 节点 并选择重命名 (或按 F2)。
- 在重命名组件窗口中，输入 Busbar。单击确定并保存模型。



定义组件耦合与探针

右键单击 **Busbar (comp1)** 下的定义节点 ，引入“组件耦合”，用于计算螺栓与电气设备接触边界上任意 **Busbar (comp1)** 变量的积分。例如，可以使用这种耦合在**全局定义**节点下的变量节点中定义一个变量，计算总电流。该变量随后可全局访问，例如，还能为供给电气设备的电流形成边界条件，该电气设备作为第二个组件建模。



定义中组件耦合的使用范围非常广。平均值 av 、最大值 max 和最小值 min 耦合的应用包括：生成结果，以及边界条件、源、沉、属性或其他任何对模型方程有贡献的项。探针  用于监视求解进度。例如，可以跟踪瞬态仿真中某个关键点的解、或参数化研究中每个参数的解。

您可以在第 128 页的“参数化扫描”中找到使用平均算子的示例。另请参见第 172 页的“函数”以获取可用的函数列表。

 要了解使用定义的更多信息，可在模型开发器中单击定义  或全局定义  节点，并按 F1 打开帮助窗口 。此窗口显示有关桌面上选定项的帮助信息，并提供文档链接。首次激活该窗口时，加载时间最多可能需要一分钟，但下次打开时会快速完成加载。

材料属性和材料库

您已使用材料节点中的功能访问母线板模型中铜和钛的属性。在材料节点中，也可以定义您自己的材料，并将其保存在材料库中。还可以为现有材料添加材料属性。如果定义的属性为其他变量的函数（通常为温度），则绘图功能可帮助您验证所需范围内的属性函数。此外，还可以使用 LiveLink™ for Excel® 来加载 Excel® 电子表格，并定义材料属性的插值函数。

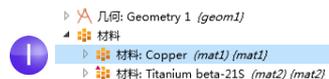
“材料库”插件包含 2500 多种材料，以及上万个温度相关的属性函数。此外，许多附加产品都包含与其应用领域相关的材料库。

首先，我们研究如何向现有材料添加属性。假设您希望在铜属性中添加体积模量和剪切模量。

定制材料

我们继续使用母线板操作。

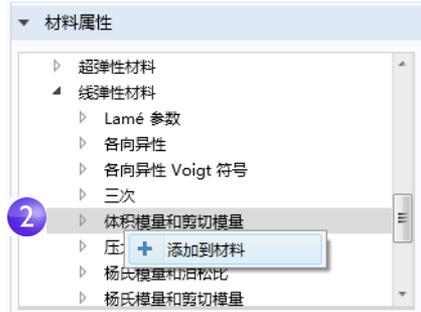
1 在模型开发器的材料节点下，单击 **Copper** 。



- 2 在材料的设置窗口中，单击展开材料属性栏，其中包含所有可定义属性的列表。

展开固体力学 > 线弹性材料栏。右键单击体积模量和剪切模量，并选择 + 添加到材料。

这样，即可在模型中定义铜的体积模量和剪切模量。



- 3 在 **Copper** 节点中，定位到材料属性明细栏。此时可在表格中看到体积模量和剪切模量行。警告符号 ⚠ 表明尚未定义值。要定义值，单击值列。在体积模量行输入 140e9，并在剪切模量行输入 46e9。



通过添加这些材料属性，您更改了 **Copper** 材料。可以将此信息保存到您自己的材料库，但不能保存到只读的“固体力学”材料库中。

- 4 在模型开发器中，右键单击 **Copper** 并选择添加到“用户定义库”。



要查看该库，在功能区的材料选项卡中单击浏览材料。

添加网格

模型组件可以包含不同的网格序列，从而使用不同的设置来生成网格。网格序列是一组用于生成网格的有序操作说明，可通过研究步骤访问。在研究中，可以选择在特定的仿真中使用哪个网格。

在母线板模型中，现在添加另一个网格节点，创建在螺栓和弯曲的周围区域进行细化的网格。

添加网格

1 打开先前创建的模型 `busbar.mph`。

2 要在单独的文件中保留该模型以便稍后使用，可选择文件 > 另存为，并将模型重命名为 `busbar_I.mph`。

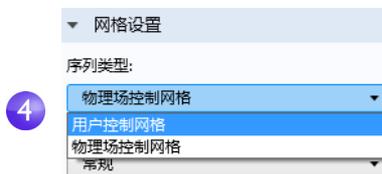
3 要添加另一个网格节点，右键单击组件 1 节点 ，并选择添加网格

。（如果您遵循第 98 页的“参数、函数、变量和耦合”中的操作说明，则名称不是组件 1，而是 **Busbar**。）

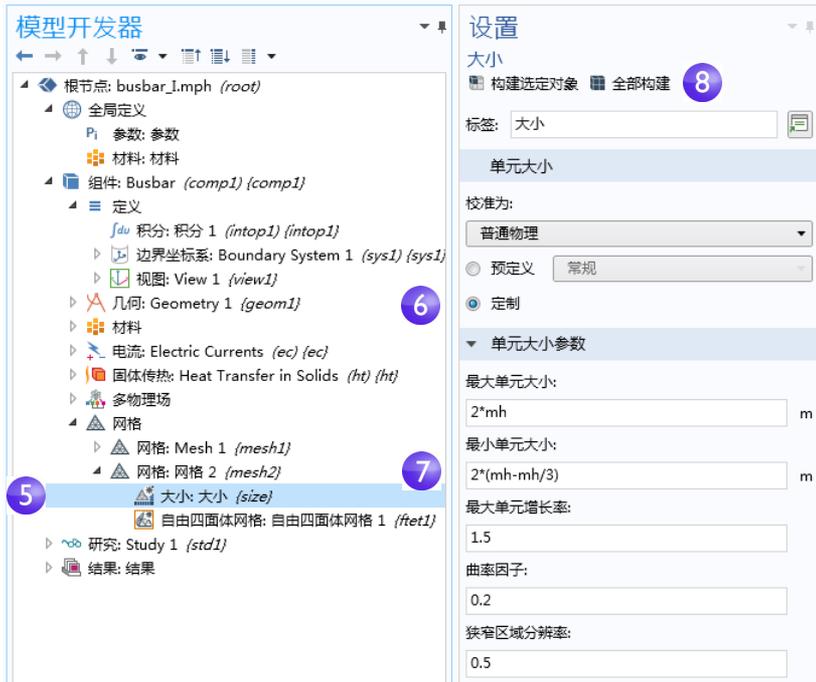
通过添加另一个网格节点，可创建一个同时包含网格 1 和网格 2 的网格父节点。

4 单击网格 2 节点。在网格“设置”窗口的网格设置栏下，选择用户控制网格作为序列类型。

此时，网格 2 下会出现大小和自由四面体网格节点。



5 在模型开发器的网格 2 节点下，单击大小 。



节点图标右上角的星号 (*) 表明该节点处于编辑状态。

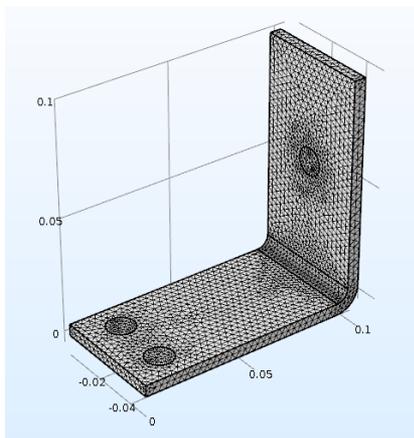
6 在大小设置窗口的单元大小栏中，单击自定义按钮。

7 定位到单元大小参数栏：

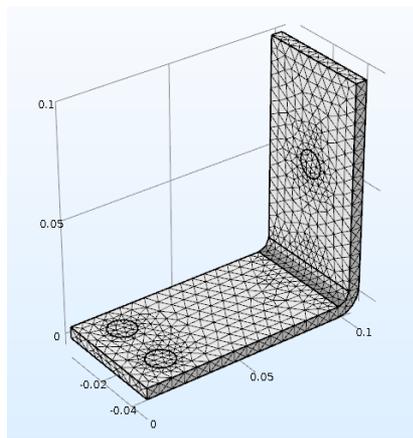
- 在最大单元大小框中输入 $2*mh$ ，其中 mh 为 3 mm - 先前定义的网格控制参数。
- 在最小单元大小框中输入 $2*(mh-mh/3)$ 。
- 在曲率因子框中输入 0.2。

8 单击全部构建 。将文件另存为 busbar_I.mph。

通过单击**网格**节点来比较**网格 1** 和**网格 2**，网格会在**图形**窗口中更新。创建多个网格的另一备选方法是对最大网格大小的参数 **mh** 运行参数化扫描，该参数已在第 59 页的“全局定义”章节定义。



网格 1



网格 2

添加物理场

向现有模型添加物理场时，COMSOL Multiphysics 极具适应性与兼容性的显著特性会更加突出。在本节中，您将体验如何轻松处理这种看似难以执行的任务。按照这些说明，可以在母线板模型中添加结构力学和流体流动分析。

结构力学

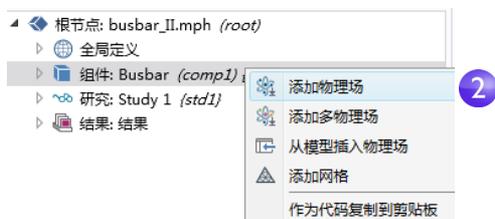
完成母线板的焦耳热仿真后，我们得知母线板会升温。那么热膨胀会带来哪些机械应力呢？要回答这个问题，让我们展开模型，引入与结构力学相关联的物理场。

❗ 要完成这些步骤，需要“结构力学模块”或“MEMS 模块”（这些模块增强了核心“固体力学”接口）。

如果您希望添加流体流动产生的冷却效应，或者没有“结构力学模块”或“MEMS 模块”，则可在阅读完本节后前往第 115 页的“添加流体流动进行冷却”一节。

1 打开之前创建的模型 `busbar.mph`。从主菜单中选择 **文件 > 另存为**，并将模型重命名为 `busbar_II.mph`。或者，您也可以从“案例库”加载 `busbar.mph` 模型，如前所述。

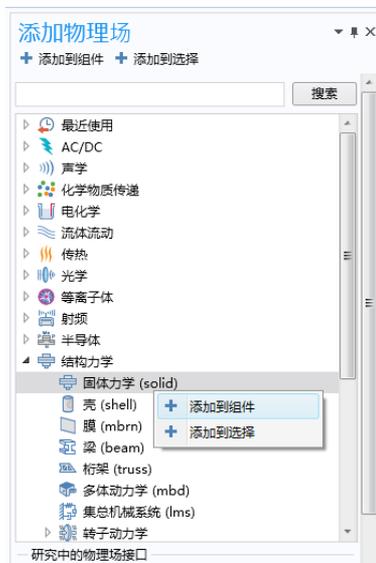
2 在模型开发器中，右键单击组件 1 节点  并选择 **添加物理场** 。



3 在添加物理场窗口的结构力学下，选择 **固体力学** 。

要添加此接口，可以右键单击并选择 **添加到组件**，或单击窗口顶部的 **+ 添加到组件** 按钮。

4 关闭添加物理场窗口并保存文件。



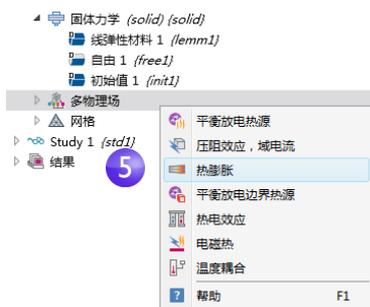
 添加其他物理场时，需确保材料节点中包含的材料具有所选物理场需要的所有属性。在本例中，所有属性均可用于铜和钛。

您可以先在结构分析中添加热膨胀效应。

5 在模型开发器中，右键单击多物理场节点  并选择热膨胀 。

热膨胀节点会添加到模型树中。

也可以使用功能区，从物理场选项卡中选择多物理场 > 热膨胀。



6 在热膨胀的设置窗口中，从选择列表中选择所有域。即可在铜和钛螺栓中启用热膨胀。

此窗口的热膨胀属性栏显示有关热膨胀系数和应变参考温度的信息（还提供一些更高级的设置）。热膨胀系数采用材料节点中的值。应变参考温度的默认值为 293.15 K（室温），定义了不发生热膨胀的温度。设置窗口底部的耦合接口栏显示哪两个物理场接口用于定义传热和固体力学的物理场。当模型组件中包含多个传热或固体力学的物理场接口时，此设置非常有用。保留此窗口中的所有默认设置。

接下来，在钛螺栓位置对母线板施加约束。

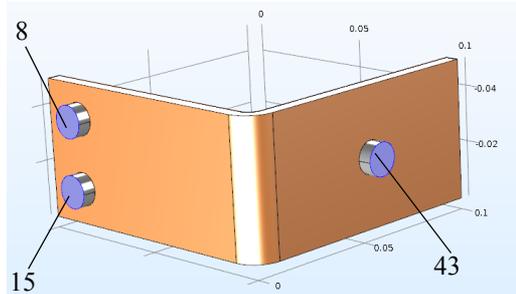


7 在模型树中，右键单击**固体力学** ，然后从边界层中选择**固定约束** 。同名的节点会添加到模型树中。

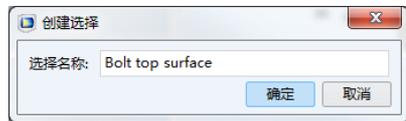
8 单击**固定约束**节点 。在**图形**窗口中，旋转母线板以查看背面。单击一个螺栓的圆形表面，将其添加到**选择**列表中。



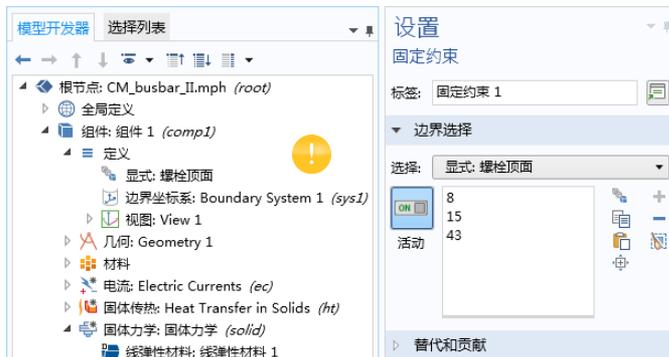
9 对其余螺栓重复此操作过程，添加边界 8、15 和 43。



❗ 为方便管理多个边界选择，可以将这些边界分组到用户定义的选择中。选定边界 8、15 和 43 后，单击**创建选择**按钮  并为其命名，如**螺栓顶面**。



然后，该选择会作为节点添加到**组件 1 > 定义**下，并可通过所有边界条件类型的**设置**窗口中的**选择**列表进行访问。可以使用该技巧对域、边界、边和点进行分组。



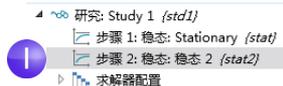
接下来，将结合添加的物理场来更新研究节点。

求解焦耳热和热膨胀

假设材料温度不变、变形很小，且不考虑电接触压力效应，母线板中的焦耳热效应与应力和应变无关。这意味着您可以仅将温度用作结构分析的输入来运行仿真。换句话说，扩展后的多物理场问题为弱耦合。因此，可以分别在两个单独的研究步骤中求解以节省计算时间：第一步研究焦耳热，第二步进行结构分析。在更高级的分析中，可以包含上述所有效应。

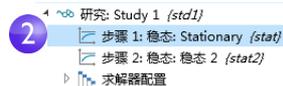
❗ 对于本例，可以跳过这些步骤，直接单击**计算**。不过，以下技巧对节省计算时间和内存资源很有帮助，尤其适用于较大规模的仿真。

- 1 在模型开发器中，右键单击**研究 1**  并选择**研究步骤 > 稳态 > 稳态** ，以添加另一个稳态研究步骤。



❗ 添加研究步骤时，需手动连接正确的物理场及其对应的研究步骤。我们首先禁用第一步中的结构分析。

- 2 在**研究 1**下，单击**步骤 1: 稳态**节点 。
- 3 在稳态的设置窗口中，定位到**物理场和变量选择**。



- 4 在**固体力学 (solid)** 行对应的求解列，单击将复选标记 更改为 ，从**研究步骤 1**中移除**固体力学**。

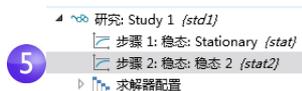
在多物理场栏中，保留所有默认设置。

4

物理场和变量选择		
<input type="checkbox"/> 修改研究步骤的模型配置		
物理场接口	求解	离散化
Electric Currents	<input checked="" type="checkbox"/>	物理场设置
Heat Transfer in Solids	<input checked="" type="checkbox"/>	物理场设置
固体力学	<input type="checkbox"/>	物理场设置

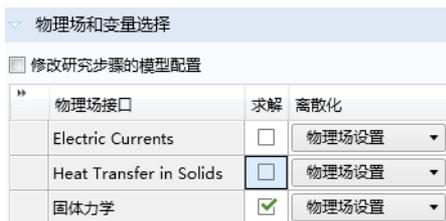
现在重复上述步骤，从第二个研究步骤中移除**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)**。

- 5 在**研究 1**下，单击**步骤 2: 稳态 2** 。



6 在物理场和变量选择的电流 (ec) 和固体传热 (ht) 行, 单击将复选标记 更改为 , 从步骤 2: 稳态 2 中移除“焦耳热”。

6



7 右键单击研究 1 节点 , 并选择计算 = (或按 F8, 也可以单击功能区中的计算) 进行求解。

7



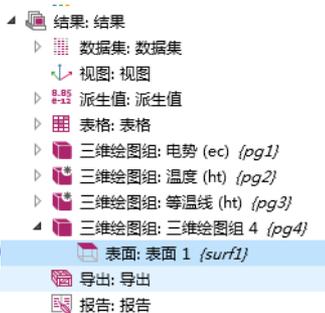
将文件另存为 busbar_II.mph, 此时文件包含固体力学接口和附加的研究步骤。

产生的变形

由于添加了物理场接口, 因此需要为固体力学手动添加附加绘图。首先添加位移图。

1 在结果 > 三维绘图组 4 下, 单击表面 1 节点 .

1



- 2 在表面设置窗口的表达式栏中，单击替换表达式按钮 。



从上下文菜单中，选择模型 > 组件 1 > 固体力学 > 位移 > solid.disp - 总位移。

也可以在表达式框中输入 solid.disp。

现在，改为更合适的单位。在设置窗口的表达式栏中，从单位列表中选择 mm（或在编辑框中键入 mm）。

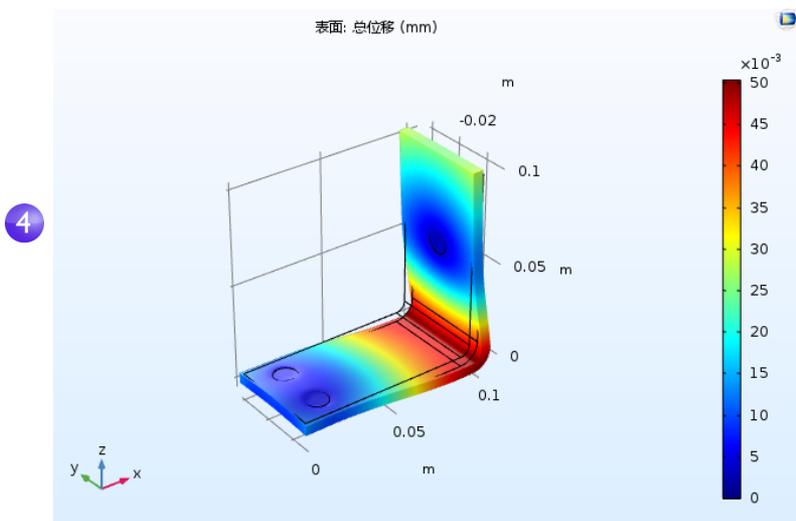


- 3 单击范围展开该栏。然后单击以清除手动控制颜色范围复选框。

由热膨胀引起的局部位移显示为表面图。接下来，我们将添加母线板变形的相关信息。

- 4 在模型开发器的结果 > 三维绘图组 4 下，右键单击表面 1 节点  并添加变形节点 。绘图会在图形窗口中自动更新。单击切换到默认三维视图按钮 ，此时您的视图看上去与下图相似。

! 下图所示的变形已明显放大，使实际发生的极小扭曲更加直观。



5 保存 busbar_II.mph 文件，此时文件包含带变形的表面图。

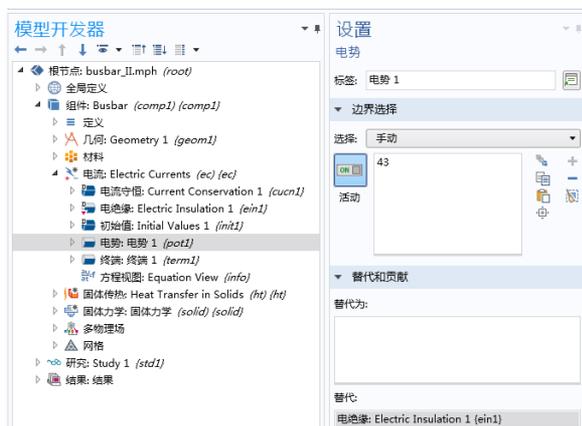
! 您还可以绘制 von Mises 应力和主应力，评估母线板与螺栓的结构完整性。

替代和贡献：独占和贡献节点

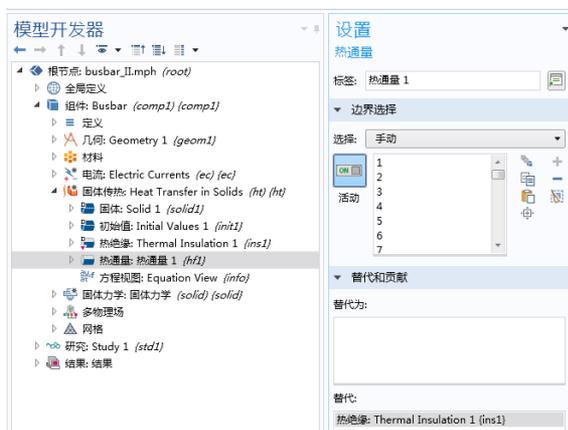
系统会从物理场接口的模型树节点顶部开始向下逐一访问这些节点。下方的节点可以完全或部分替代或遮蔽序列中较早的节点，具体取决于选择内容。物理场接口节点的类型有两种：独占和贡献。节点的处理方式取决于其类型。

约束边界条件是独占节点的典型示例，代表性的边界条件包括电势或固定约束。例如，对于电流，如果同一边界有两个以上电势节点，则序列中的最后一个电势节点将替代其他节点的设置。接地节点也是独占节点，同样会替代任意先前节点指定的边界条件。

下图显示电势设置窗口中的替代和贡献栏。替代列表表明，此边界条件优先于默认的电绝缘边界条件。



通量边界条件（例如用于指定热通量的边界条件）是贡献节点的典型示例。您可以堆叠多个热通量边界条件，它们都将成为总热通量的组成部分。在下图显示的示例中，**热通量 2** 边界条件替代了默认的热绝缘边界条件，并与**热通量 1** 一起成为热通量的组成部分。



在模型树中，替代和贡献关系分别由红色箭头和橙色的圆来表示。

添加流体流动进行冷却

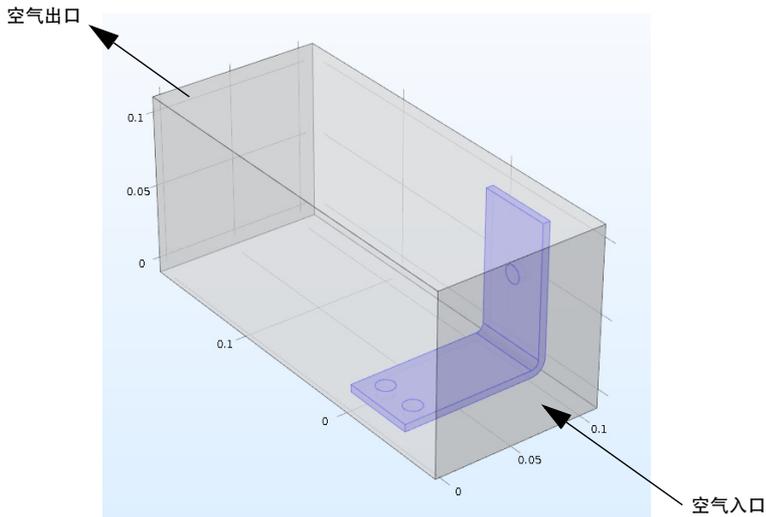
在分析母线板中生成的热以及可能导致的热膨胀后，建议您研究通过使空气流过母线板表面将其冷却的方式。由于该模型仅包含焦耳热（不含先前的热膨胀分析），因此这些步骤不需要任何附加模块。



如果您有“CFD 模块”，则可以使用**非等温流动**多物理场接口。如果有“传热模块”，则可以使用**共轭传热**多物理场接口。这两个接口都自动定义了固体和流体中的耦合传热，包括层流或湍流，不过在本例中，我们将手动进行这些设置，并尝试一些有限的功能。

通过在焦耳热模型中添加流体流动，可以创建新的多物理场耦合。要模拟流动域，需要在母线板周围为外部流动创建空气框。可以在第一个模型中改变几何来手动完成，也可以通过打开案例库文件来完成。为节省时间，可以打开一个已创建空气框的文件。

加载几何后，您将学习如何根据下图来模拟空气流动：

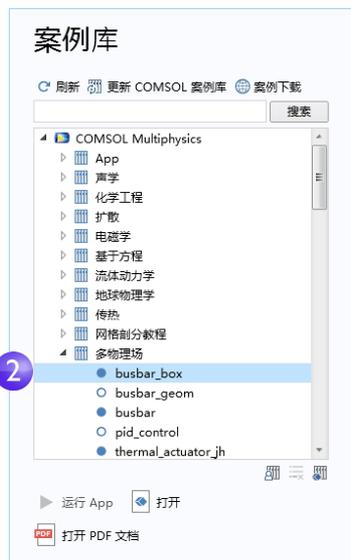


定义入口速度

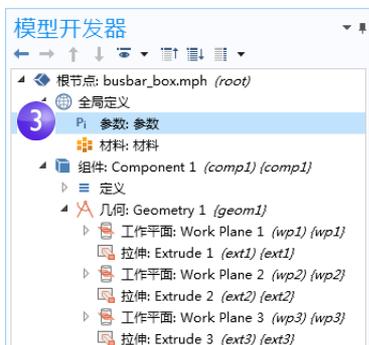
首先加载几何，并为入口流速添加新参数。

- 1 如果您刚重新打开软件，则单击**取消按钮**  来关闭自动打开的**新建窗口**。
- 2 单击**主屏幕选项卡**，从**窗口菜单**中选择**案例库** 。导航至 **COMSOL Multiphysics > 多物理场 > busbar box**。（也可以直接从**文件菜单**中打开“案例库”。）

双击以打开文件，其中包含几何以及截止第 102 页的“定制材料”章节末尾已完成的物理场建模步骤。



- 3 在全局定义下，单击**参数节点** P_1 。
- 4 在参数的设置窗口中，单击 **Vtot** 行正下方的空行。在**名称列**中输入 **Vin**。在**表达式列**中输入 **1e-1[m/s]**，并在**描述列**中输入选择的描述，如**入口速度**。





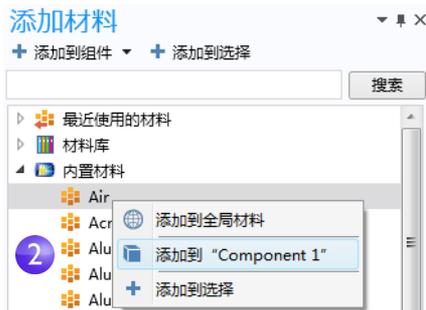
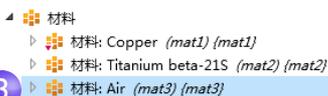
名称	表达式	值	描述
L	9[cm]	0.09 m	Length
rad_1	6[mm]	0.006 m	Bolt radius
tbb	5[mm]	0.005 m	Thickness
wbb	5[cm]	0.05 m	Width
mh	3[mm]	0.003 m	Maximum element size
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m^2·K)	Heat transfer coefficient
Vtot	20[mV]	0.02 V	Applied voltage
Vin	1e-1[m/s]	0.1 m/s	Inlet velocity

- 5 选择**文件 > 另存为**，并使用新名称 **busbar_box_I.mph** 保存模型。

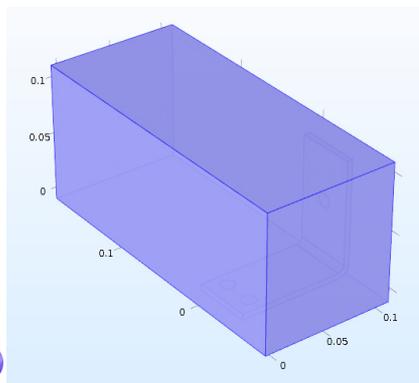
添加空气

下一步是添加空气的材料属性。

- 1 从主屏幕选项卡选择添加材料 （或右键单击材料节点并选择从库中添加材料）。
- 2 在添加材料窗口中，展开内置材料节点。右键单击 **Air** 并选择添加到组件 1。关闭添加材料窗口。
- 3 在模型开发器的材料下，单击 **Air** 节点 。



- 4 在图形窗口工具栏中，单击缩放到窗口大小 。
- 5 在图形窗口中，单击空气框（域 1）将其添加到选择列表中，其颜色会变为蓝色。此步骤可将空气材料属性指派给空气框。

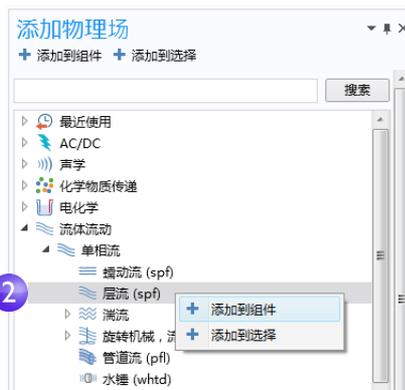


添加流体流动

现在添加流体流动物理场。

- 1 在模型树中，右键单击组件 1  并选择添加物理场 。

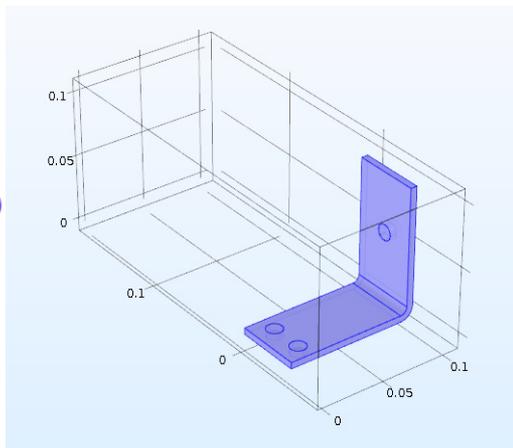
2 在添加物理场窗口的流体流动 > 单相流下，右键单击层流  并选择 + 添加到组件。层流将显示在模型树的组件 1 下。关闭添加物理场窗口。



3 在图形工具栏中，单击透明按钮 。然后单击线框渲染按钮 。这两个设置使我们更容易查看框的内部。在建模过程中，可根据需要来打开或关闭这些设置，控制所用的渲染类型。

由于您已在模型中添加流体流动，因此需要将空气域（域 1）从电流 (ec) 接口移除（假设空气无导电性，因此不含电流），然后将焦耳热多物理场接口的传热部分与流体流动进行耦合。

4 在模型树中，选择电流 (ec) 节点 。在图形窗口的空气域上移动鼠标指针，并单击将其从选择列表中移除。此时，只有母线板应被选中，且以蓝色突出显示。

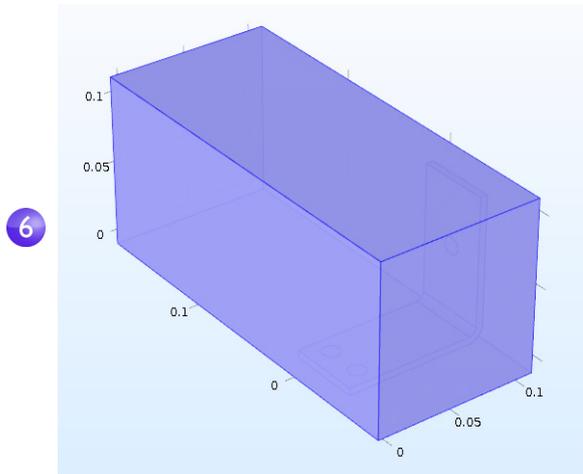


- 5 在模型开发器中，右键单击**固体传热** 。在上下文菜单的第一栏（域层 ），选择**流体**。



- 6 在图形窗口中，单击**空气域**（域 1）将其添加到**选择列表**。

现在，耦合流体流动与传热现象。



- 7 在**流体设置窗口**的**模型输入**栏中，从**速度场**列表中选择**速度场 (spf)**。然后，从**绝对压力**列表中选择**绝对压力 (spf)**。

此操作可标识**层流**接口中的**流场**和**压力**，并将其与传热进行耦合。



现在，通过在流体域中指定传热的入口和出口来定义边界条件。

- 8 在模型开发器中，右键单击**固体传热** 。在上下文菜单的第二栏（边界栏 ），选择**温度**。

温度节点会添加到模型树中。

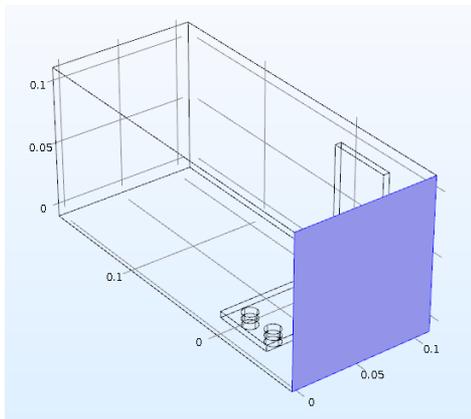


- 9 在图形窗口中，单击入口边界（边界号 2），将其添加到选择列表中。

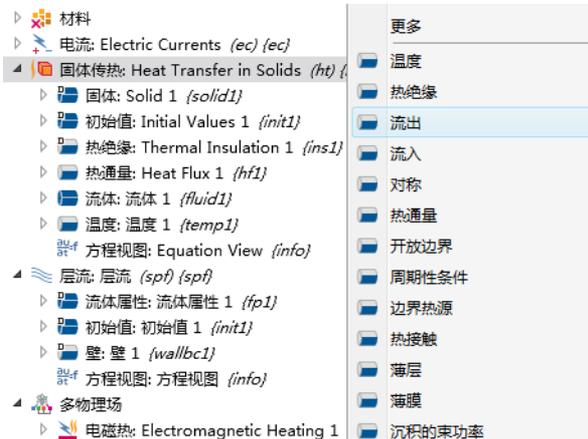
此操作可将入口温度设为默认设置 293.15 K。

此时图形应如右图所示。（根据您的设置是否打开透明和线框渲染，显示可能会略有差异。）继续定义出口。

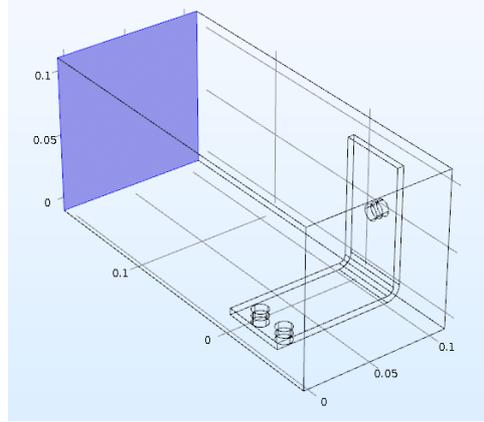
9



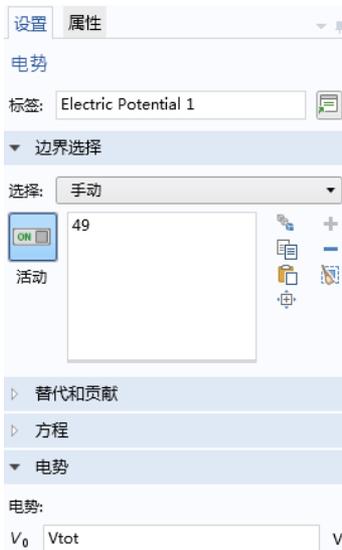
- 10 在模型开发器中，右键单击**固体传热** 。在边界层，选择**流出**。流出节点  会添加到模型树中。



- 11 在图形窗口中，单击出口边界（边界号 5），将其添加到选择列表中。选择前，可以使用鼠标滚轮来滚动（或使用键盘上的上下箭头）将边界突出显示。



即使为空气域添加了框几何，母线板、螺栓、电势 1 和接地 1 等边界设置也都保留了正确的选择。要确认这一点，可在模型树的电流节点下单击电势 1 和接地 1 节点，确认其边界选择正确。



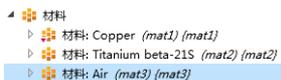
接下来继续设置流动属性。您需要指明流体流动仅发生在流体域中，然后设置入口、出口和对称条件。为此，首先从选择中移除所有域，然后添加空气域。

- 1 在模型树中，单击层流节点 。在层流的设置窗口中，单击清除选择按钮 。



- 2 在图形窗口中，单击空气框（域 1）将其添加到选择中。

 比较好的做法是，确认材料节点下的 **Air** 材料是否具有此多物理场组合所需的所有属性。在模型树的材料下，单击 **Air**。在材料“设置”窗口的材料属性明细栏下，确认是否缺少任何属性，即带有警告符号  的项。请参见第 65 页的“材料”章节，以了解更多信息。



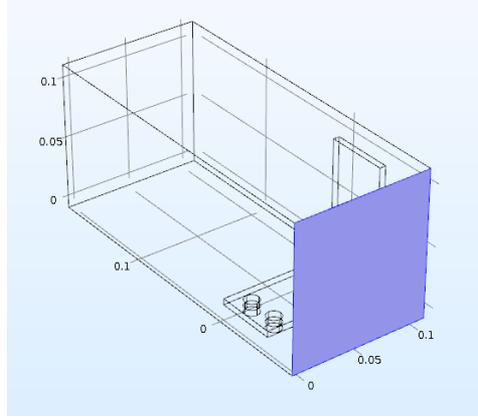
接下来继续操作边界。

- 3 在模型开发器中，右键单击层流 ，并在边界层选择入口。入口节点  会添加到模型树中。



- 4 在图形窗口中，单击入口（边界 2）将其添加到选择列表中。

4



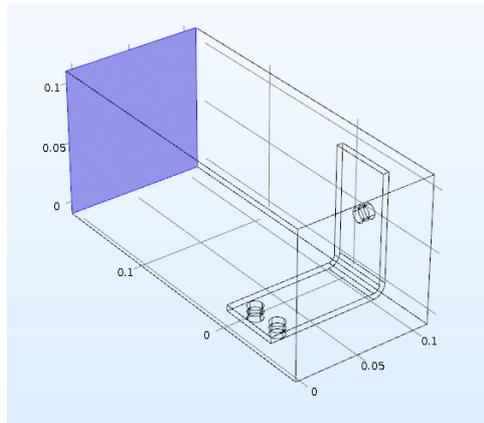
- 5 定位到入口设置窗口，在速度栏的 U_0 框中，输入 V_{in} 以设置法向流入速度。

5



- 6 右键单击层流 , 并在边界层选择出口 。在图形窗口中，单击出口（边界 5）将其添加到选择列表中。选择前，可以使用鼠标滚轮来滚动或使用键盘上的箭头，将边界突出显示。

6

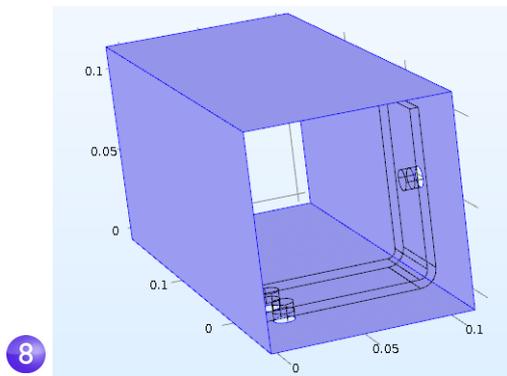


最后一步是添加对称边界。为方便起见，假设空气在通道面外的流动情况与面内的流动类似。该假设可通过对称条件来正确表示。

- 7 右键单击层流 , 并选择对称。对称节点  会添加到序列中。

8 在图形窗口中，单击下图所示的每个蓝色面（边界 1、3、4 和 48），将其全部添加到**选择**列表中。您可能需要使用鼠标滚轮或旋转几何将其全部选中。

保存 busbar_box_I.mph 文件，此时文件包含 **Air** 材料和层流接口设置。



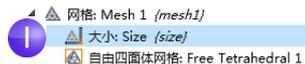
! 如果已知边界号，则可以单击**粘贴选择**按钮  并输入信息。对于本例，在**粘贴选择**窗口中输入 1,3,4,48。单击**确定**，这些边界会自动添加到**选择**列表中。



粗化网格

为了快速得到解，我们将稍微更改网格，使其更稀疏一些。当前网格设置会使求解时间相对较长，以后您始终可以细化网格。

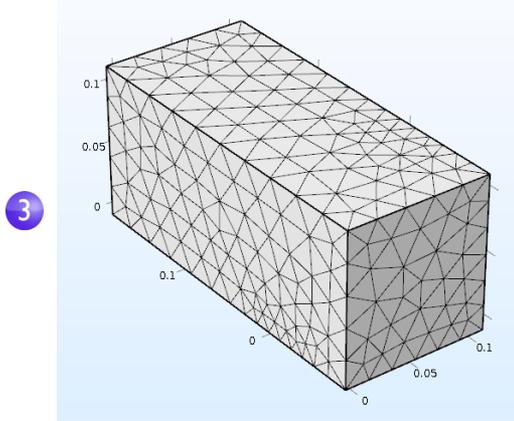
1 在**模型开发器**中展开**网格 1**节点 ，并单击大小节点 .



- 在大小设置窗口的单元大小栏中，单击预定义按钮，并确保选择常规。



- 单击全部构建按钮 。图形窗口中会显示带网格的几何（您可能需要关闭透明才能看到如下所示的图）。



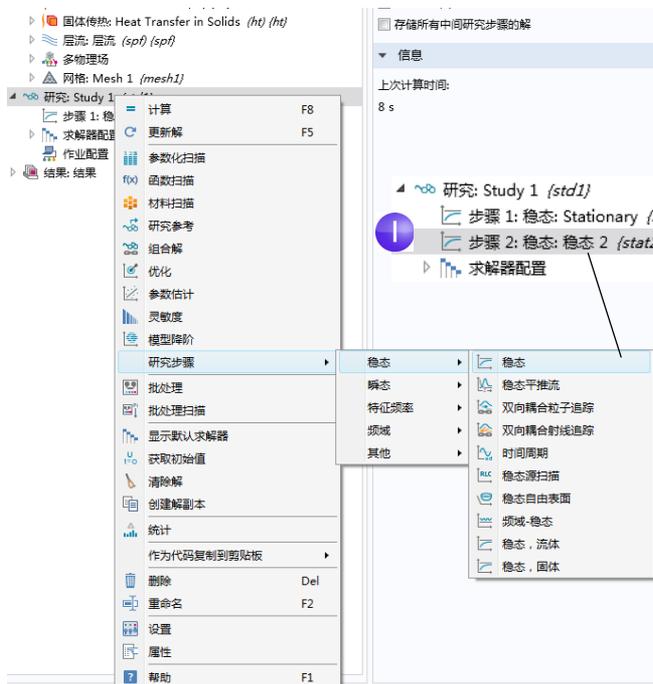
可以假定空气流速足够大，从而忽略流场中升温的影响。

因此，可以先求解流场，然后再将流场的求解结果用作输入来求解温度。这可以通过研究序列来实现。

求解流体流动和焦耳热

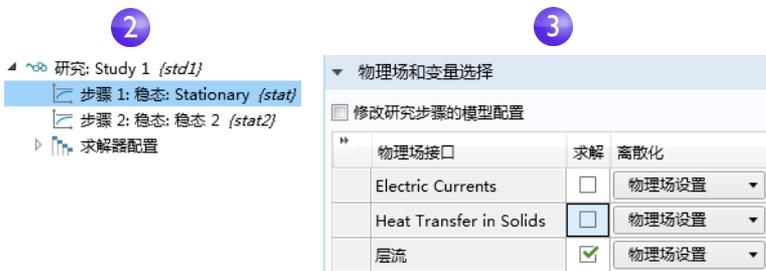
如果在求解温度场之前先求解流场，则会产生弱耦合的多物理场问题。本节介绍的研究序列可以自动求解这类弱耦合或单向耦合。

- 1 在模型树中，右键单击**研究 1** 并选择**研究步骤 > 稳态 > 稳态**，将另一个稳态研究步骤添加到模型开发者中。



接下来，需要将正确的物理场连接至对应的研究步骤。首先禁用与第一步中的焦耳热关联的**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)** 接口。

- 2 在**研究 1** 下，单击**步骤 1: 稳态**。



- 3 在稳态的设置窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。在**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)** 行对应的求解列中，单击以将复选标记 更改为 ，从而在**步骤 1** 中移除焦耳热效应。

- 4 重复这一步骤。在研究 1 下，单击步骤 2：稳态 2 。在物理场和变量选择下的层流 (spf) 行中，单击求解列，将复选标记 更改为 。

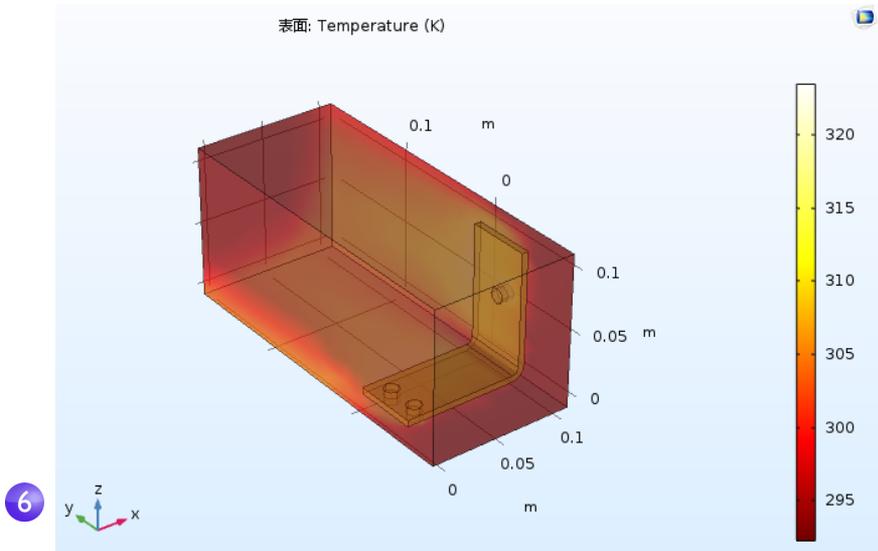


- 5 右键单击研究 1 节点  并选择计算  (也可以按 F8，或单击功能区中的计算按钮)。现在，将自动创建新的求解器序列，并依次对层流和焦耳热进行求解。



- 6 求解完成后，在模型开发器的结果节点下，选择温度 (ht) 图。如果尚未打开透明，可单击图形工具栏中的透明按钮 ，将框内的温度场可视化。要进行缩

放，使用鼠标中键单击并按住鼠标按钮（或滚轮），同时拖动鼠标。



图形窗口中显示的温度表面图显示了母线板和周围框中的温度。我们还可以看到，由于网格相对稀疏，温度场并不平滑。要获得更平滑的解，比较好的做法是通过细化网格来计算精度。

- 7 现在，保存 `busbar_box_I.mph` 文件，以便随时再次使用。接下来的步骤将使用原始的 `busbar.mph` 文件。

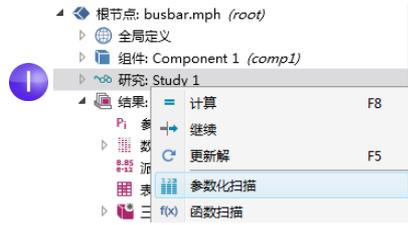
参数化扫描

扫描几何参数

为满足特定约束条件，生成多个设计实例通常会很有帮助。在先前的母线板示例中，设计目标可能是降低工作温度或减小电流密度。我们将演示第一个目标。由于电流密度取决于母线板的几何，改变宽度 `wbb` 会改变电流密度，这反过来又会影响工作温度。让我们对 `wbb` 运行参数化扫描来研究这种变化。

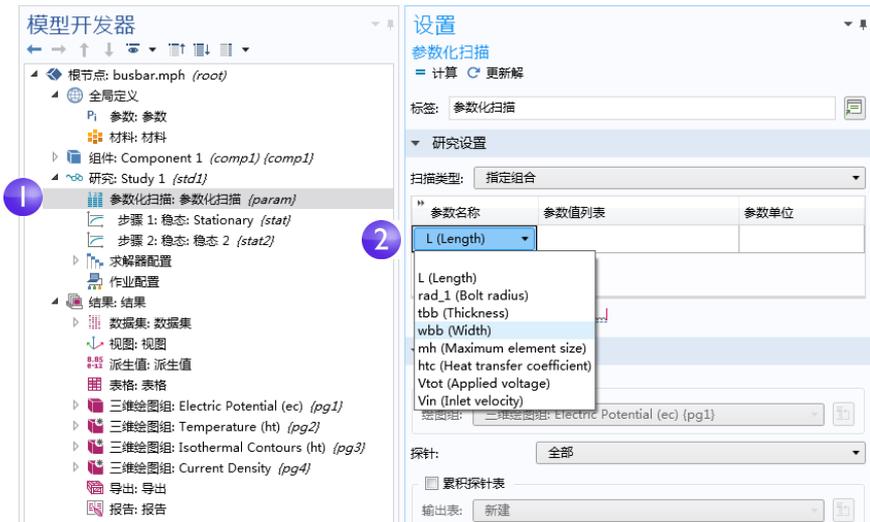
添加参数化扫描

- 1 从文件菜单中打开模型文件 `busbar.mph`。如果未保存模型，也可以从“案例库”中将其打开：文件 > 案例库 > COMSOL Multiphysics > 多物理场 > `busbar`。



在模型开发器中，右键单击研究 1 并选择参数化扫描。参数化扫描节点将添加到模型开发器序列中。

- 2 在参数化扫描设置窗口的空参数表下，单击添加按钮 +。从表格的参数名称列表中选择 `wbb`。



- ! 扫描类型用于控制具有多个参数的参数化扫描。您可以选择是扫描给定参数的所有组合，还是扫描指定组合的子集。

3 输入一定范围的参数值，对母线板宽度以 1 cm 的增量从 5 cm 扫描到 10 cm。
可通过不同的方式输入该信息：

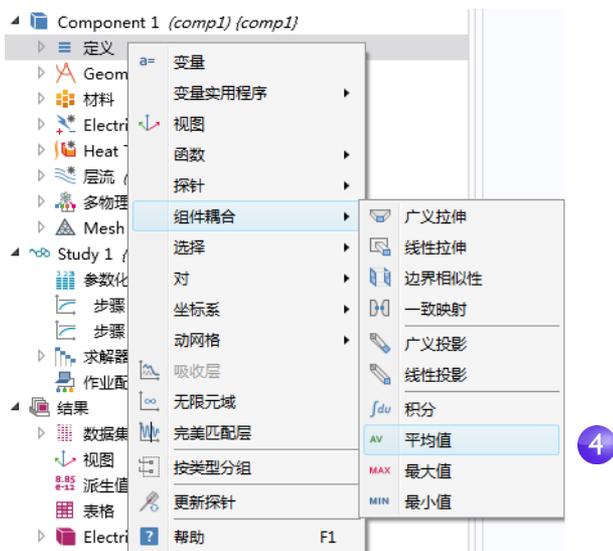
- 在**参数值列表框**中复制并粘贴，或输入 `range(0.05,0.01,0.1)`。
- 单击**参数值列表框**，然后单击**范围**  按钮，并在**范围**对话框中输入值。在**起始框**中输入 `5e-2`。在**步长框**中输入 `1e-2`，并在**停止框**中输入 `1e-1`。单击**替换**。
- 对于任一种方法，还可以使用长度单位来替代默认的 SI 单位制（米）。可以输入 `5[cm]` 来代替 `5e-2`；同样，输入 `1[cm]` 代替 `1e-2`，`10[cm]` 代替 `1e-1`。也可以在模型树根节点的**设置窗口**中更改默认的单位制。



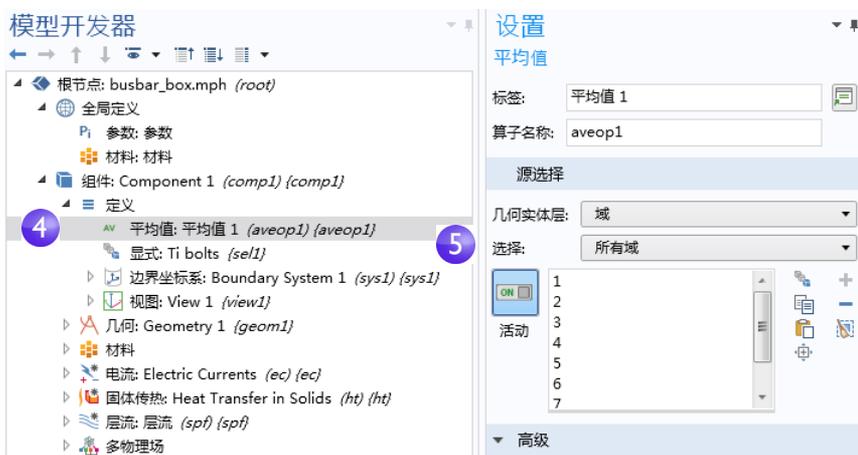
接下来，定义一个**平均组件耦合**，稍后可用于计算母线板中的平均温度。



4 在组件 1 下，右键单击定义  并选择组件耦合 > 平均值 。



5 在平均值的设置窗口中，从选择列表中选择所有域。



此时会创建一个名为 **aveop1** 的算子，可用于计算在所选域上定义的任何物理量的平均值。稍后，我们将使用此工具来计算平均温度，但也可以计算平均电势、电流密度等。

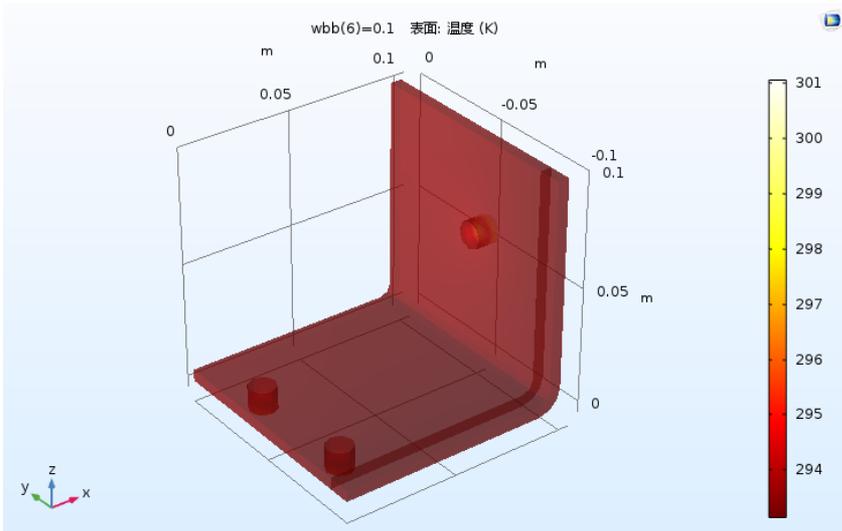
6 选择文件 > 另存为，用新名称 **busbar_III.mph** 保存模型。

7 右键单击**研究 1**  并选择**计算**  以运行扫描，或在**主屏幕**选项卡中单击**计算**。

参数化扫描结果

在模型树的**结果**节点下单击**温度 (ht) 1** 节点（第二个温度图节点）。

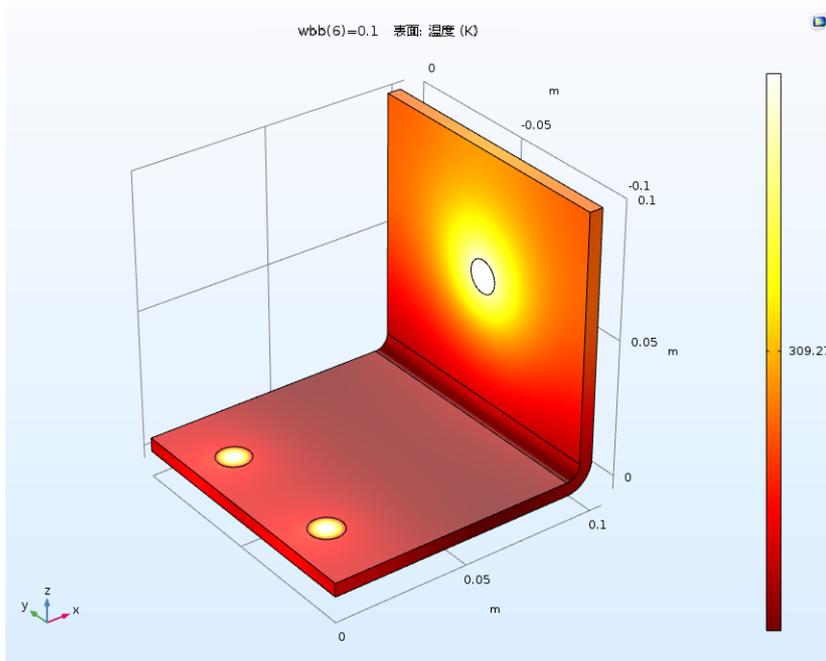
图形窗口中显示的绘图展示了较宽母线板中的温度，即使用最后一个参数值 $wbb=0.1$ [m]（10 [cm]）时的温度。选择图形窗口工具栏中的**缩放到窗口大小** ，查看整张绘图。结果绘图的颜色非常一致，因此我们需要更改最大颜色范围。



1 在**温度 (ht) 1** 节点下，单击**表面**节点 .

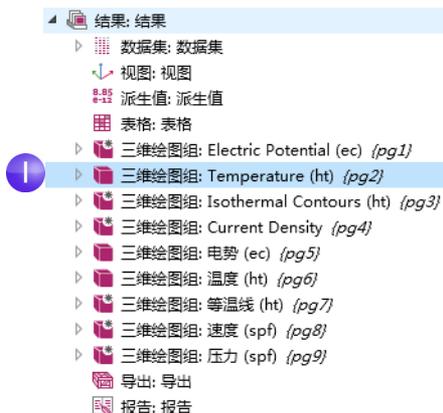


- 2 在表面的设置窗口中，单击范围展开该栏。选中手动控制颜色范围复选框。在最大值框中输入 309.5（替换默认值）。
- 3 图形窗口中会更新对应于 $wbb=0.1$ [m] (10 [cm]) 的温度 (ht) 1 图。



绘图根据您运行的版本可能会略有不同。比较一下宽母线板绘图与 $wbb=0.05$ [m] (5 [cm]) 时的温度图。为此，您可以重用之前定义的一个绘图组。

1 在模型开发器中，单击第一个温度 (ht) 节点 。

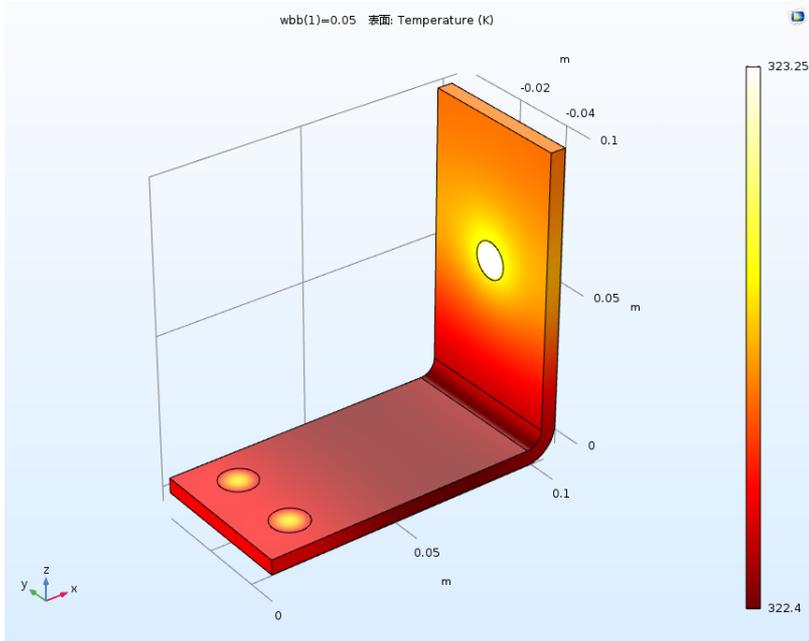


2 在三维绘图组的设置窗口中，从数据集列表中选择研究 1/ 参数化解 1。该数据集包含参数化扫描的结果。



3 在参数值列表中，选择 **0.05**（表示 $wbb=5\text{ cm}$ ）。单击绘制按钮 。单击图形窗口工具栏中的缩放到窗口大小按钮 。

温度 (ht) 图会根据 $wbb=0.05$ [m] (5 [cm]) 进行更新。请注意, 如果您已更新该绘图的颜色范围, 则绘图应与下图相似。否则, 请按照以下后续步骤操作。



与较宽母线板类似, 绘图的颜色可能非常一致, 因此需要更改最大颜色范围。

- 1 在第一个温度 (ht) 节点下, 单击表面节点 .
- 2 在表面的“设置”窗口中, 单击范围展开该栏 (如果尚未展开)。选中手动控制颜色范围复选框。
- 3 在最大值框中输入 323.25 (替换默认值)。

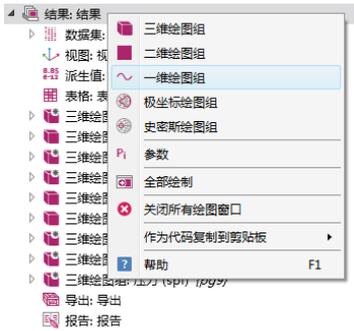
图形窗口中会更新对应于 $wbb=0.05$ [m] (5 [cm]) 的温度 (ht) 图。

单击第一个和第二个温度图节点, 在图形窗口中比较绘图。随着母线板宽度从 5 cm 增至 10 cm, 最高温度有所下降。

添加更多绘图

要进一步分析这些结果, 可以绘制每个宽度的平均温度。

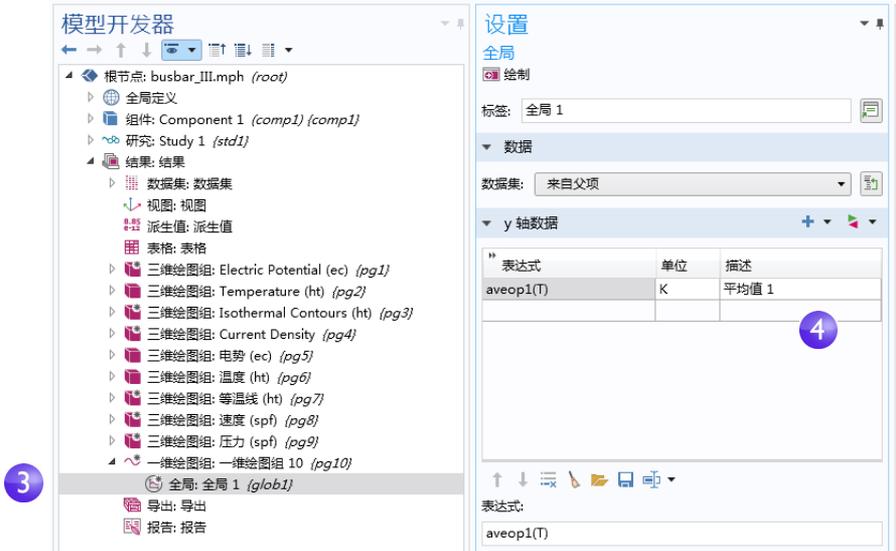
1 右键单击结果  并添加一维绘图组 。



2 在一维绘图组的设置窗口中，从数据集列表中选择研究 1/ 参数化解 1。

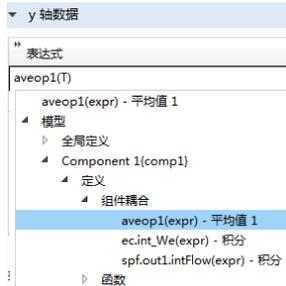


3 在模型开发器中，右键单击一维绘图组 8，并添加全局  节点。



4 在全局设置窗口的 y 轴数据栏下，单击表达式列中的第一行，然后输入 aveop1(T)。该算子是在第 131 页中定义的，可供后续使用。您可以使用类似语法来计算其他量的平均值。

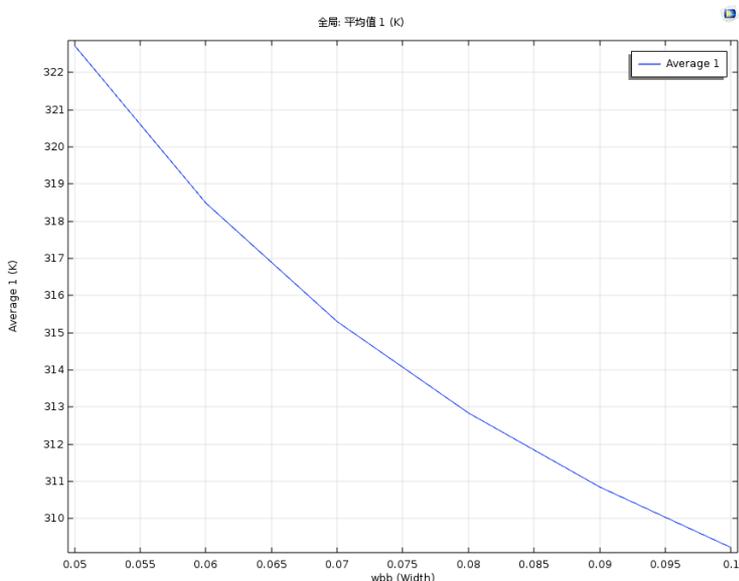
 也可以在单击第一行后使用 Ctrl+/ 来自动完成。



 要在不求解的情况下使用耦合算子，可通过右键单击研究节点来选择可用的更新解选项。



5 单击绘制按钮 ，并将这些使用参数化扫描结果的附加绘图保存到 busbar_III.mph 模型。

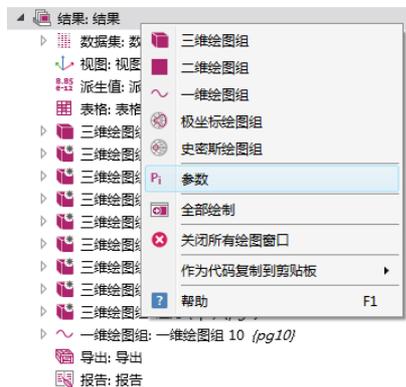


在该绘图中，平均温度会随宽度的增加而降低。

结果中的参数

为了实现更高的灵活性，可定义仅在结果节点中使用的参数。使用这些参数时无需解析模型。以下示例演示如何对结果下定义的参数进行动画播放。

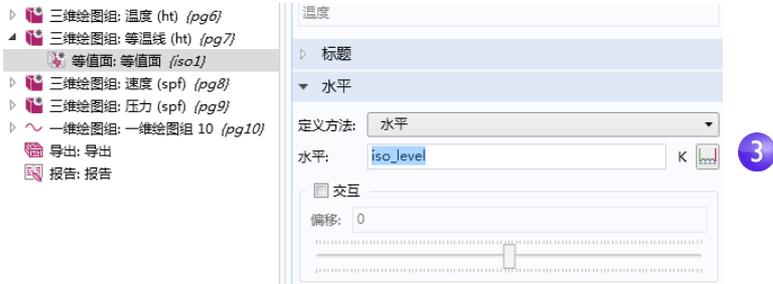
1 右键单击结果节点并选择参数。



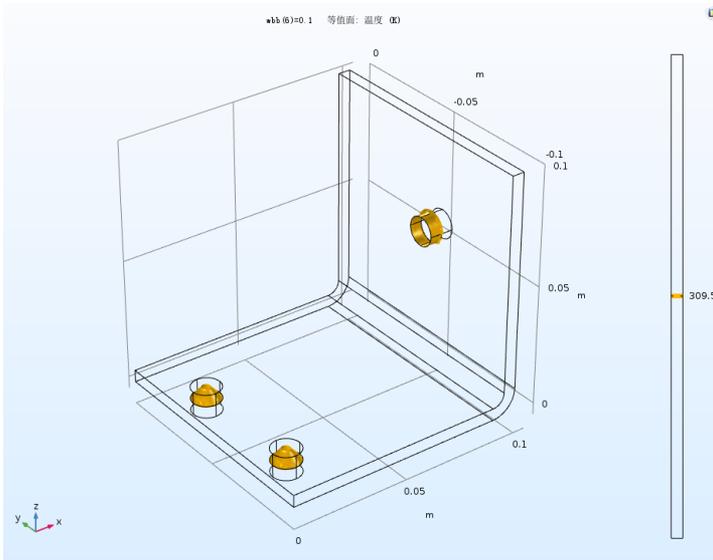
2 定义一个参数 `iso_level`，其表达式为 `309.5[K]`。



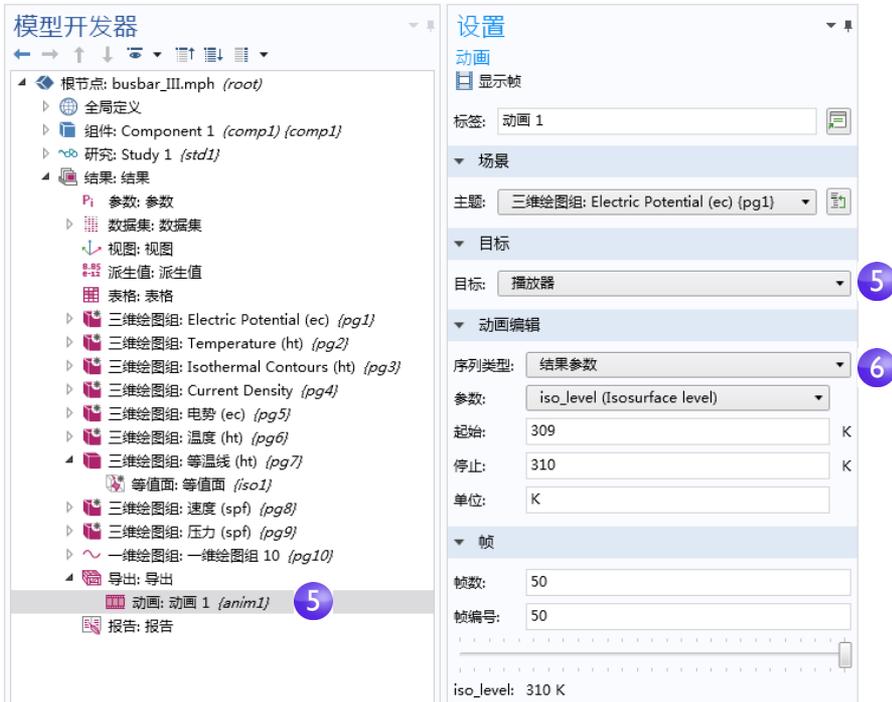
3 对于等温线 (ht) 1 绘图组，在等值面图的设置窗口中，将定义方法更改为水平。在水平表达式栏中键入 `iso_level`。



4 在同一设置窗口中，单击绘制。



- 5 通过选择功能区中等温线 (ht) 1 选项卡的动画菜单中的播放器选项，或右键单击“导出”节点并选择动画 > 播放器来生成动画。



- 6 在动画的设置窗口中，将序列类型更改为结果参数，然后选择 iso_level 参数。在起始框中键入 309，并在停止框中键入 310。单击图形工具栏中的播放按钮或动画设置窗口中的显示帧按钮。要获取更平滑的动画，可以增加帧数，例如改为 50。

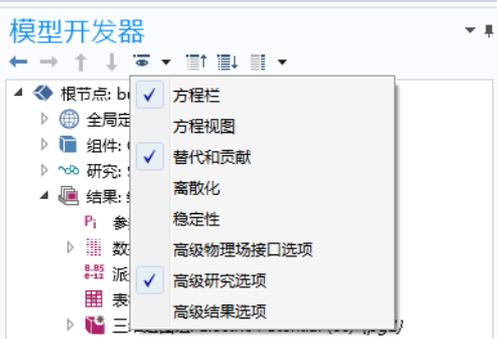
参数化扫描这一主题引出了并行计算问题；如果能同时求解所有参数，则可以极大提高计算效率。

并行计算

COMSOL Multiphysics 和 COMSOL Server 支持大多数形式的并行计算，包括多核处理器的共享内存并行计算以及集群和云的高性能计算 (HPC)。所有

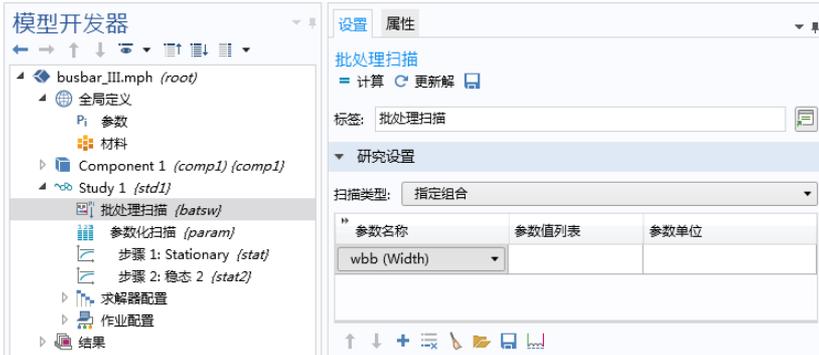
COMSOL 许可证均支持多核计算。对于集群计算或云计算（包括并行扫描），则需要“网络浮动许可证”（FNL）。

可以通过以下两个选项之一来使用集群或云计算：**集群扫描**或**集群计算**。如果您有“网络浮动许可证”，则可以通过右键单击**研究**节点来调用这两个选项。不过，需要先启用**高级研究选项**，方法是单击**模型开发器**工具栏中的**显示按钮**  并选择**高级研究选项**。



集群扫描

集群扫描选项用于并行求解多个模型，每个模型都具有一组不同的参数。这可以视为广义的**参数化扫描**。右键单击**研究**节点以添加**集群扫描**节点。



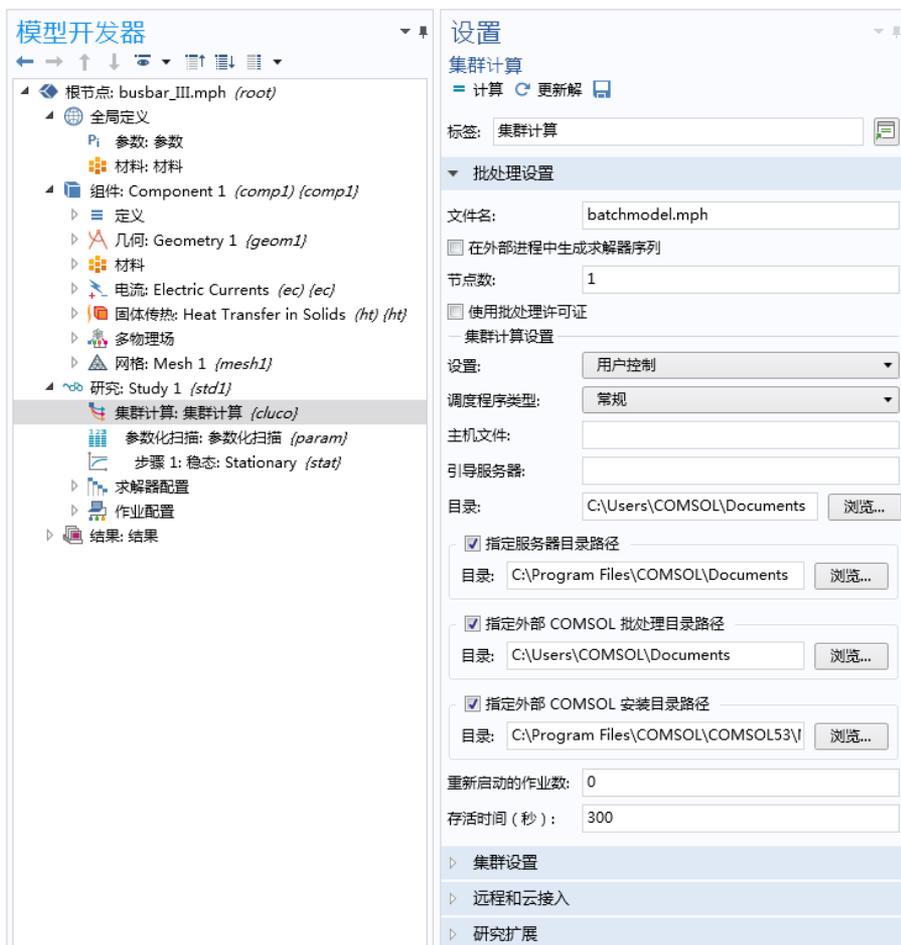
集群扫描的研究设置类似于**参数化扫描**，但还需要一些额外设置才能使用集群或云计算。上图显示了与第 128 页的“参数化扫描”中定义的扫描相同时，**集群扫描**设置窗口顶部的显示情况。要运行本例中的**集群扫描**，首先需要移除**参数化扫描**节点。

集群计算

您还可以利用集群或云计算，使用分布式内存来求解单个大型模型。为实现最佳性能，COMSOL 软件集群实现可利用每个节点上的共享内存多核处理功能，同基于消息传递接口 (MPI) 的分布式内存模型结合使用。这也称为混合式并行，可以最大程度地利用计算能力，从而带来显著的性能提升。

右键单击研究节点，添加集群计算节点。集群计算节点不能与集群扫描结合使用。计算机将提示您是否在继续操作之前先移除集群扫描。选择是。

集群计算的设置窗口（如下所示）有助于通过集群或云的设置来管理仿真。



从**调度程序类型**列表中选择要执行的集群作业的类型。COMSOL Multiphysics 和 COMSOL Server 支持“常规”、Windows® HPC Server (HPCS) 2008/2012/2016、Open Grid Scheduler/Grid Engine (OGS/GE)、SLURM 或“未分配”。常规选项是 Linux® 集群的多用途选项。其他集群和调度程序设置，如**前缀命令**和**后缀命令**，通过**文件菜单**中的**首选项窗口**提供。

如需了解并行运行的更多信息，请参阅 Reference Manual。

COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器

通过“网络浮动许可证”(FNL)使用 COMSOL Multiphysics 时，可以使用客户端 - 服务器操作模式访问远程计算资源以求解大型模型，同时仍使用本地机器的显卡来显示图形。(此操作模式不应与结合 COMSOL App 使用的 COMSOL Server 产品相混淆。)

使用 COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器模式具有明显的优势，因为工程和科学计算问题需要处理大量的数据 - 在仿真过程中，通常会生成从兆字节到千兆字节的数据。要生成并存储这些数据，建议您使用的计算机配备快速处理器、大容量的随机存取存储器 (RAM) 和一个大硬盘。要对大量数据集进行可视化，本地计算机配备高端显卡非常重要。

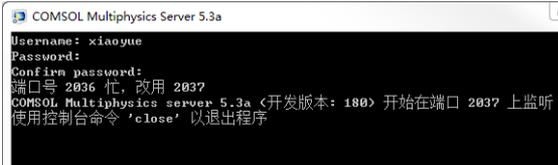
在理想条件下，应始终使用具有较大内存和较强处理能力的高端计算机来执行所有仿真步骤。但如果事实并非如此，在需要求解大型模型时，则可能需要跨网络访问共享的计算资源。

不论何时使用 COMSOL Multiphysics，都可以通过客户端 - 服务器操作模式连接到远程计算资源。这一过程包含两个步骤。首先，登录远程系统并调用 COMSOL Multiphysics 服务器，即可启动 COMSOL Multiphysics 服务器进程并打开网络连接。接下来，在本地机器上，只需将网络连接信息输入打开的 COMSOL Multiphysics 会话中。随后，软件会在网络上明确地来回传送模型数据和结果，并使用远程计算资源执行所有计算。

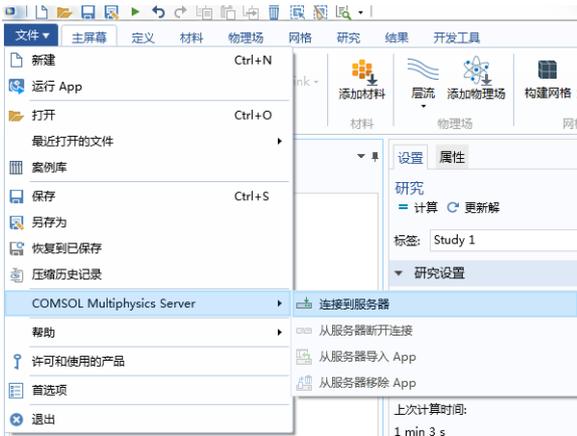
启动 COMSOL Multiphysics 服务器会话的方式有多种。例如，在 Windows® 7 中，可以从开始菜单的 **COMSOL Multiphysics 5.3a > Client-Server** 下启动服务器会话。在 Windows® 10 中，可通过 Windows 开始菜单的 **COMSOL Launchers** 选项来启动服务器会话。在 Linux® 中，可以使用 `comsol mphserver` 命令。服

服务器和客户端会话可在不同的操作系统上运行。例如，服务器可以在 Linux® 中运行，而客户端会话则可以在 Windows® 中运行。

在计算机上首次启动 COMSOL Multiphysics 服务器时，系统会要求您提供与客户端 - 服务器操作模式关联的用户名和密码，并将自动存储供将来连接。下图显示在 Windows 中启动服务器会话的命令窗口。



下图显示如何从 COMSOL Desktop 用户界面连接到服务器会话。要进行连接，可以从文件菜单中选择 **COMSOL Multiphysics Server > 连接到服务器**。



此时，系统会提示您输入在首次启动服务器会话时提供的用户名和密码。



有关运行 COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器的更多信息，请参阅 Reference Manual。

附录 A - 构建几何

本节将详细介绍如何使用 COMSOL Multiphysics 内置的几何工具来创建母线板几何。其中的分步操作说明将引导您使用全局定义部分中设置的参数来构造几何。

模型树中“几何”节点下的所有几何操作都按操作的参数序列（称为几何序列）进行组织。使用参数化尺寸有助于进行各种假设分析和几何参数化扫描。

除了使用 COMSOL Multiphysics 提供的工具来构建几何外，您还可以导入通过 CAD 软件包创建的几何。可选的“CAD 导入模块”和“设计模块”支持多种 CAD 文件格式。此外，多个附加产品还提供了与通用 CAD 软件包的双向接口。请参见第 187 页的“附录 E - 使用 LiveLink™ 附加产品连接”获取相关列表。请注意，“设计模块”除了包含“CAD 导入模块”中可用的特征外，还添加了放样、倒圆角、倒斜角、中面及加厚等三维功能。

如果您尚未完成这一步，请从第 54 页的“示例 2：母线板 - 多物理场模型”开始。遵循第 31 页的“模型向导”一节中的步骤添加物理场和研究，然后按照全局定义下的步骤来添加参数。返回本节，继续学习几何建模相关知识。几何序列的第一步是绘制母线板的剖面图。

1 在组件 1 下，右键单击几何 1 并选择工作平面。在工作平面的设置窗口中：

- 从平面列表中选择 **xz** 平面（列表中的最后一个选项）。
- 在工作平面工具栏的设置窗口中，单击显示工作平面按钮。

继续编辑工作平面 1 中的轴和栅格设置。

2 在模型开发器中，展开视图 2 节点并单击轴。



3 在轴的设置窗口中：

在轴上：

- 在 **x 最小值** 和 **y 最小值** 框中，输入 **-0.01**。
- 在 **x 最大值** 和 **y 最大值** 框中，输入 **0.11**。

在栅格下：

- 选中**手动间距**复选框。
- 在 **x 间距**和 **y 间距**框中，输入 **5e-3**。

4 单击工具栏中的更新按钮。

请注意，单击更新后，键入的值将自动微调，以适应屏幕宽高比。



在图形窗口中移动和单击鼠标时，借助功能区的工作平面选项卡中的绘图工具，可以使用交互式绘图方式来创建几何。



工作平面选项卡



几何体素

您也可以右键单击工作平面 1 下的平面几何节点，将几何对象添加到几何序列中。

在接下来的几个步骤中，我们将创建母线板的剖面图。

5 在模型开发器的工作平面 1 下，右键单击平面几何 并选择矩形。

在矩形设置窗口中，定位到大小栏：

- 在宽度框中输入 $L+2*tbb$ 。
- 在高度框中输入 $0.1 [m]$ 。

单击构建选定对象按钮。

5



- 6 创建另一个矩形。在**工作平面 1**下，
右键单击**平面几何**  并选择**矩形** 。

定位到**大小**栏：

- 在**宽度**框中输入 $L+tbb$ 。
- 在**高度**框中输入 $0.1[m]-tbb$ 。

定位到**位置**栏：

- 在 **yw** 框中输入 **tbb**。

单击**构建选定对象**按钮 。

使用布尔操作**差集**从第一个矩形中减去第二个矩形。

- 7 在**工作平面 1**下，右键单击**平面几何** ，并选择**布尔操作和分割 > 差集** 。

在**图形**窗口中，单击 **r1**（两个矩形中较大的一个）将其添加到**差集设置**窗口的**要添加的对象**列表中。



为便于选择几何，可以在**图形**窗口中显示几何标签。在**模型开发器**的**几何 1 > 工作平面 1**下，单击**视图 2**节点。转到**视图**的**设置**窗口，并选中**显示几何标签**复选框。

6



8 单击差集节点。在差集的设置窗口中，单击要减去的对象列表左侧的活动选择按钮。选择较小的矩形 r2，方法是使用鼠标滚轮或箭头键来循环切换重叠的矩形，先将其突出显示，然后单击将其选中。

单击构建选定对象 。

在图形窗口中选择 r2 的另一种方式是使用选择列表功能。转至功能区主屏幕选项卡，然后选择窗口 > 选择列表。在选择列表中单击以突出显示 r2（实体）。然后，在列表中右键单击 r2（实体）并选择添加到选择，将其添加到要减去的对象列表中。右键单击选择列表窗口标题，并选择关闭。

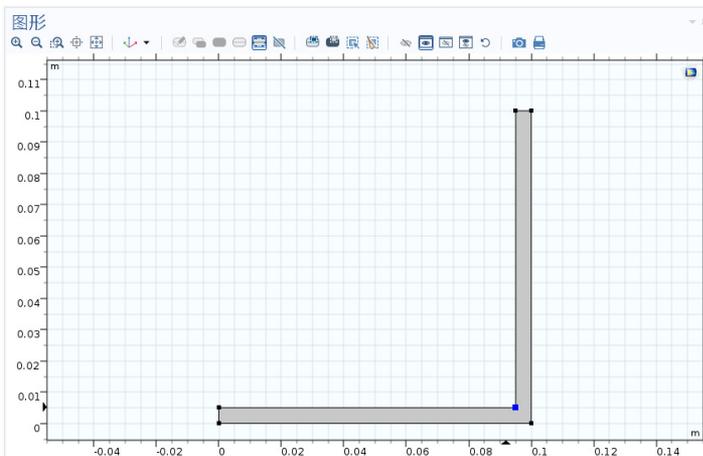
7



8

构建选定的几何后，您会得到一个反 L 形的剖面。继续对这个 L 形剖面的拐角进行倒圆。

8



9 在工作平面 1 下，右键单击平面几何  并选择圆角 。

选择点 3（右下角内侧）将其添加到要倒圆角的顶点列表中。可以通过多种不同的方式添加点：

- 在图形窗口中，单击点 3 将其添加到要倒圆角的顶点列表中。
- 从主屏幕选项卡中选择窗口 > 选择列表。在选择列表窗口中，单击 3。对应的点会在图形窗口中突出显示。在圆角的设置窗口中单击添加到选择按钮 ，或在选择列表中右键单击。



10 在半径框中输入 **tbb**。单击构建选定对象 。

即可在内拐角处创建圆角。

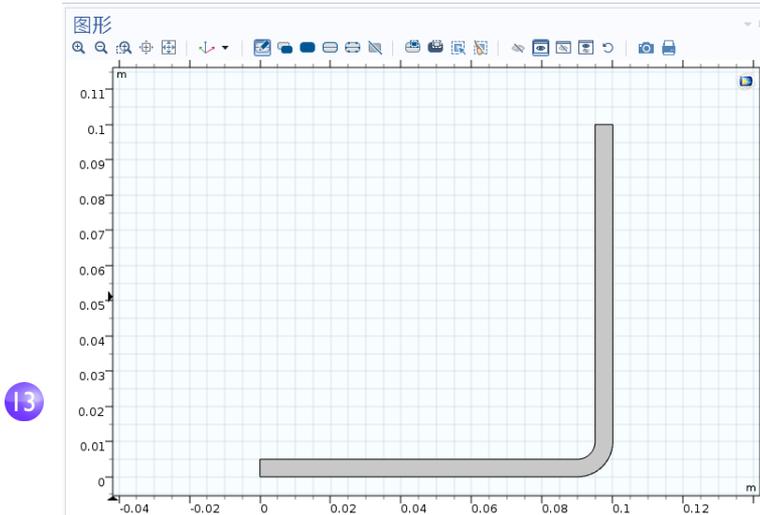
11 对于外拐角，右键单击平面几何  并选择圆角 。

12 在图形窗口中，单击点 6（外拐角），将其添加到要倒圆角的顶点列表中。

13 在半径框中输入 **2*tbb**。单击构建选定对象 。



结果应与下图相符：



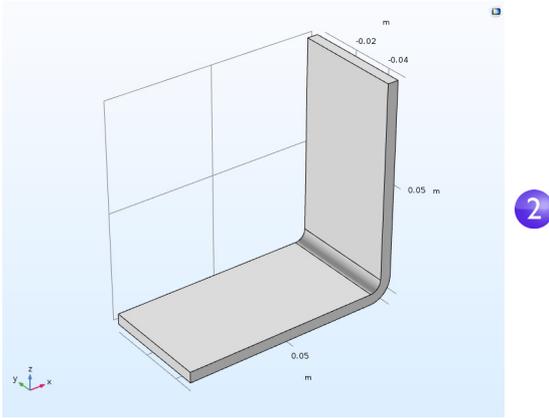
接下来，拉伸工作平面以创建三维母线板几何。

- 1 在模型开发器中，右键单击工作平面 1 并选择拉伸。在拉伸的“设置”窗口中，在到面的距离表中输入 wbb（替换默认值）以拉伸至剖面的宽度。



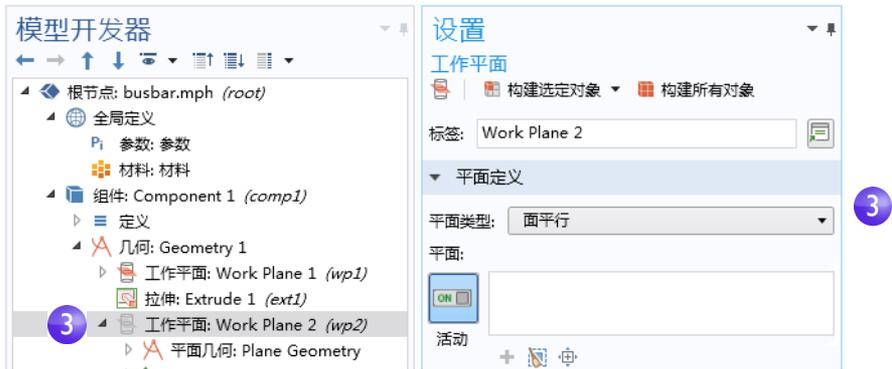
表格支持输入多个值，以创建包含不同材料的夹层结构。在本例中，只需要拉伸一个层。

- 2 单击**构建选定对象** ，然后单击**图形工具栏**中的**缩放到窗口大小**  按钮。单击**保存按钮** ，并将模型命名为 `busbar.mph`（如果尚未执行此操作）。



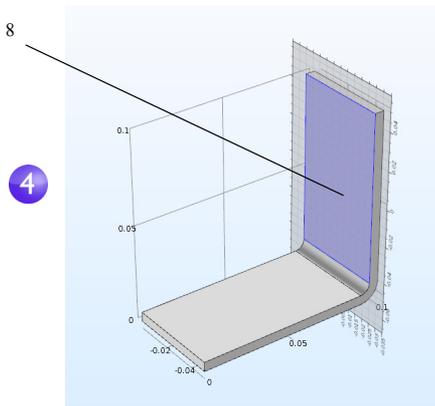
接着，通过拉伸在两个工作平面中绘制的两个圆来创建钛螺栓。

- 3 在**模型开发器**中，右键单击**几何 1**  并添加**工作平面** 。此时会添加**工作平面 2** 节点。在**工作平面设置窗口**的**平面定义**栏下，选择**面平行**作为平面类型。



4 在图形窗口中，单击“面”8（如下图所示），将其添加到工作平面“设置”窗口的平面列表中。

“面”8 现在以蓝色突出显示，工作平面将定位到该面的顶部。



5 单击显示工作平面按钮  来绘制第一个圆，表示第一个螺栓的位置。单击图形工具栏中的缩放到窗口大小按钮 .

6 在工作平面 2 下，右键单击平面几何  并选择圆 .

定位到圆的“设置”窗口：

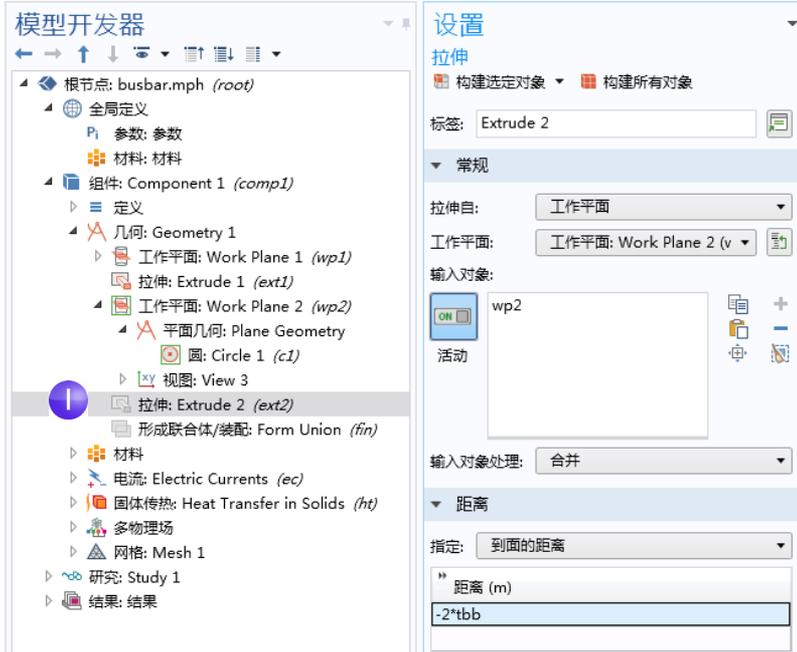
- 在大小和形状栏的半径框中，输入 rad_1。
- 在位置栏中，保留默认的 **xw** 和 **yw** 坐标 (0, 0)。

单击构建选定对象 .

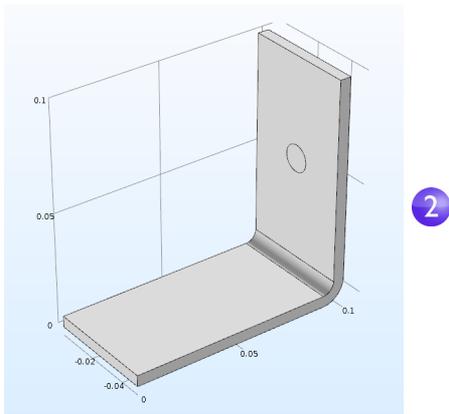


通过添加拉伸操作来继续创建螺栓。

- 1 在模型开发器中，右键单击工作平面 2 并选择拉伸。在拉伸的“设置”窗口中，在到面的距离表格的第一行输入 $-2*tbb$ 来拉伸圆。



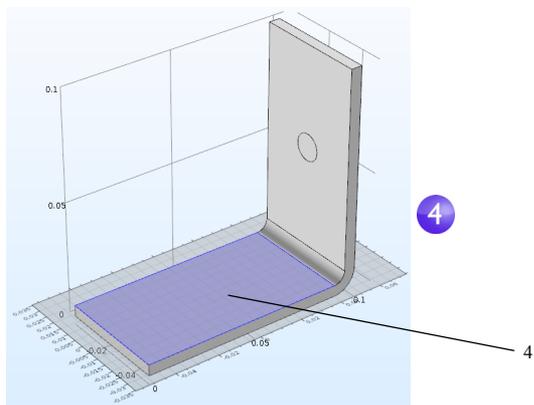
2 单击**构建选定对象按钮** ，创建钛螺栓穿过母线板的圆柱部分。



绘制其余两个螺栓。

3 右键单击几何 **1**  并选择**工作平面** 。此时会添加**工作平面 3** 节点。对于**工作平面 3**，在**工作平面的设置窗口**中，从**平面类型列表**中选择**面平行**。

4 在**图形窗口**中，单击“面” **4**（如下图所示），将其添加到**工作平面设置窗口**的**平面列表**中。



5 单击**工作平面设置窗口**中的**显示工作平面按钮** ，并单击**图形工具栏**中的**缩放到窗口大小按钮** ，获取最佳的几何视图。

要参数化其余两个螺栓的位置，添加圆以形成螺栓的横截面。

- 6 在工作平面 3 下，右键单击平面几何 \mathcal{A} 并选择圆 \bigcirc 。

定位到圆的设置窗口：

- 在大小和形状栏的半径框中输入 rad_1 。
- 在位置栏的 xw 框中输入 $-L/2+1.5[cm]$ ，并在 yw 框中输入 $-wbb/4$ 。

单击构建选定对象 \square 。

6



复制刚创建的圆，在母线板中生成第三个螺栓。

6

- 7 在工作平面 3 下，右键单击平面几何 \mathcal{A} ，并选择变换 > 复制 \square 。

- 8 在图形窗口中，单击“圆 c1”将其选中并添加到复制设置窗口的输入对象列表中。

- 9 在复制的设置窗口中，在位移栏的 yw 框中输入 $wbb/2$ 。

8

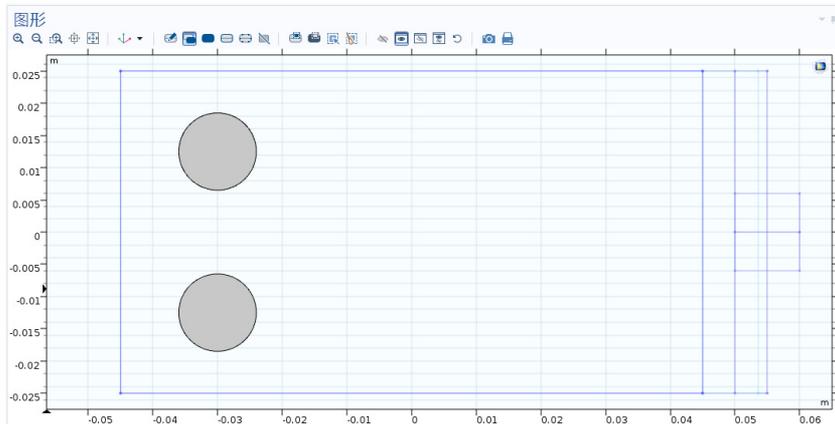


9

10 单击构建选定对象 ，并单击图形工具栏中的缩放到窗口大小按钮 。

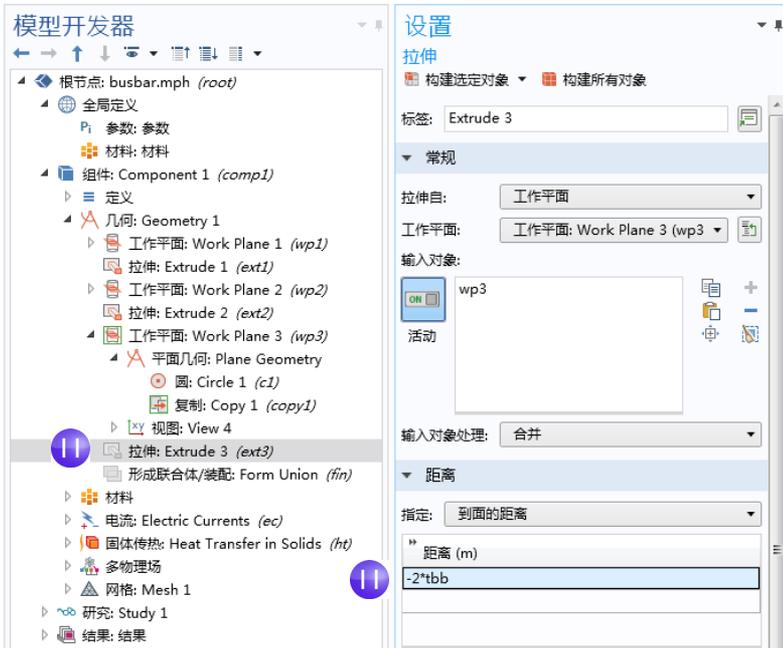
现在，工作平面中显示的几何应与下图相符。

10

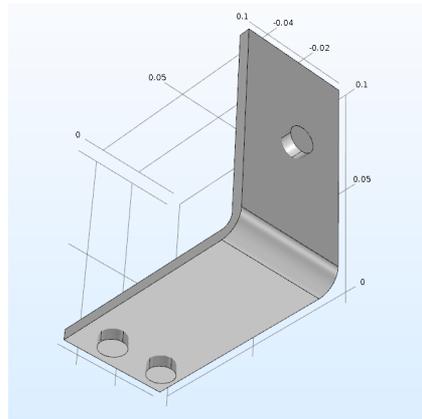
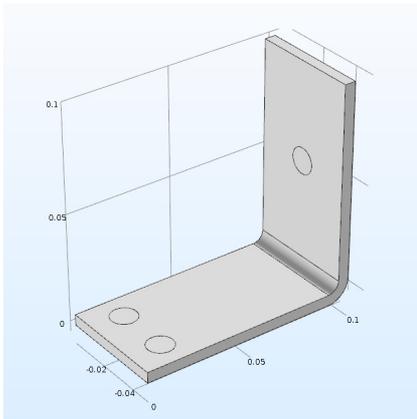


继续对圆执行拉伸操作。

- 11 在模型开发器中，右键单击工作平面 3 并选择拉伸。在拉伸的设置窗口中，在到面的距离表的第一行输入 $-2*tbb$ （替换默认值）。单击构建所有对象。



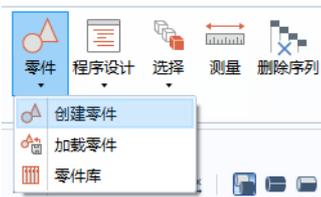
几何及相应的几何序列应与下图相符。单击保存按钮，并将模型命名为 busbar.mph。



创建零件和使用零件库

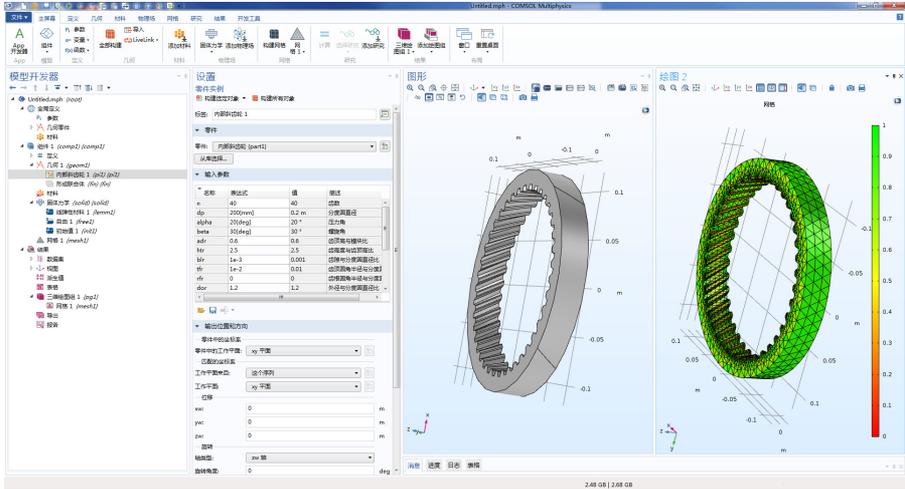
建立母线板或其他几何模型后，可以方便地将其保存供将来使用，避免不必要的重复操作。在刚刚完成的操作步骤中，几何直接存储在 COMSOL 模型文件中，该几何也将用于建立完整的母线板模型。当然，您也可以创建可重用或参数化的零件，作为更复杂的 COMSOL 模型几何的构建块，该零件存储在单独的文件中，可通过“零件库”进行访问。

在构建母线板几何时，您使用了几何与工作平面选项卡上的一些特征。零件菜单位于这些选项卡的其他组中。



通过零件菜单，您可以选择创建或加载零件，也可以通过从“零件库”中选择一个零件将其添加到模型几何中。默认情况下，软件提供了多个“零件库”。在创建新零件后，它们会添加到模型树全局定义部分的“零件”父节点下。

下图显示“多体动力学模块”的零件库中的内部斜齿轮零件。该零件包含 18 个输入参数，用于控制尺寸。



有关使用零件和“零件库”的附加信息，请参阅 Reference Manual。



要继续母线板教程，请返回第 65 页的“材料”章节。

附录 B - 键盘和鼠标快捷方式

这些快捷方式主要适用于“模型开发器”和“图形”窗口。有关“App 开发器”中快捷方式的信息，请参见《App 开发器简介》。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
F1 (某些平板电脑上为 Fn+F1)	F1	显示所选节点或窗口的帮助信息
Ctrl+F1	Command+F1	在外部窗口中打开“COMSOL 文档”首页
F2	F2	重命名选定的节点、文件或文件夹
F3	F3	禁用选定的节点
F4	F4	启用选定的节点
F5	F5	根据任何新的“全局定义”和“定义”来更新“数据集解”，而不重新求解模型
F6	F6	在几何分支中构建前序节点，或为瞬态、特征频率或特征值解绘制上一个绘图。
F7	F7	在几何与网格分支中构建选定的节点，计算选定的研究步骤，计算求解器序列中的选定节点，或为瞬态、特征频率或特征值解绘制下一个绘图。
F8	F8	构建几何、网格，计算整个求解器序列，更新结果数据和绘图，或运行方法调用。
Del	Del	删除选定的节点或对象
左箭头 (Windows) ; Shift+ 左箭头 (Linux)	左箭头	折叠模型树中的分支
右箭头 (Windows) ; Shift+ 右箭头 (Linux)	右箭头	展开模型树中的分支

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
上箭头	上箭头	在模型树中移至上方节点
下箭头	下箭头	在模型树中移至下方节点
Alt+ 左箭头	Ctrl+ 左箭头	在模型树中移至上一个选定节点
Alt+ 右箭头	Ctrl+ 右箭头	在模型树中移至下一个选定节点
Ctrl+A	Command+A	选择所有域、边界、边或点； 选择表中的所有单元格
Ctrl+C	Command+C	复制文本或对象
Ctrl+D	Command+D	清除域、边界、边或点的选择
Ctrl+Shift+D	Command+Shift+D	在模型树中生成所选节点的副本
Ctrl+F	Command+F	查找搜索字符串
Ctrl+K	Command+K	创建快捷方式用于“App 开发 器”
Ctrl+N	Command+N	新建模型
Ctrl+O	Command+O	打开模型文件
Ctrl+P	Command+P	打印绘图窗口的内容
Ctrl+S	Command+S	保存模型文件
Ctrl+V	Command+V	粘贴已复制的文本或对象
Ctrl+X	Command+X	剪切已复制的文本或对象
Ctrl+Y	Ctrl+Shift+Z	重做上一个撤消的操作
Ctrl+Z	Command+Z	撤消上一个操作
Ctrl+ 上箭头	Command+ 上箭头	将定义节点、几何节点、物理场 节点（默认节点除外）、材料节 点、网格节点、研究步骤节点或 结果节点上移一步
Ctrl+ 下箭头	Command+ 下箭头	将定义节点、几何节点、物理场 节点（默认节点除外）、材料节 点、网格节点、研究步骤节点或 结果节点下移一步

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
Ctrl+Tab	Ctrl+Tab	将焦点切换至桌面上的下一个窗口
Ctrl+Shift+Tab	Ctrl+Shift+Tab	将焦点切换至桌面上的上一个窗口
Ctrl+Alt+A	不可用	转至 “App 开发器”
Ctrl+Alt+M	不可用	转到 “模型开发器”
Ctrl+Alt+ 左箭头	Command+Alt+左箭头	将焦点切换至 “模型开发器” 窗口
Ctrl+Alt+ 右箭头	Command+Alt+右箭头	将焦点切换至 “设置” 窗口。
Ctrl+Alt+ 上箭头	Command+Alt+上箭头	将焦点切换至 “设置” 窗口中的上一栏。
Ctrl+Alt+ 下箭头	Command+Alt+下箭头	将焦点切换至 “设置” 窗口中的下一栏。
Shift+F10 或 (仅限 Windows) 菜单键	Ctrl+F10	打开上下文菜单。
Ctrl+Space 或 Ctrl+/ 单击并按住鼠标按键，同时拖动鼠标。	Ctrl+Space 或 Ctrl+/ 与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	打开预定义的物理量列表，可插入 “表达式” 编辑框。 绕着与屏幕 x 和 y 轴平行的轴旋转场景，原点位于场景旋转点。
右键单击并按住鼠标按键，同时拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	在图像平面上朝任意方向移动可见框。
中键单击模型外部区域并按住鼠标按键，同时拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	绕鼠标操作开始的位置放大/缩小场景。
按下 Ctrl 并单击。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	绕图像平面的 x 和 y 轴旋转来倾斜或平移相机。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
按下 Ctrl 并单击右键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	在与图像平面平行的平面上移动相机。
按下 Ctrl 并单击中键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	移动相机使其靠近和远离对象（推近 / 拉远）。
按下 Ctrl 并单击中键。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	缩放到模型中的点（由鼠标位置确定）周围的区域。
按下 Ctrl+Alt 并单击。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	绕轴旋转相机。
按下 Alt 并单击。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	绕相机与场景旋转点之间的轴旋转相机（滚动方向）。
按下 Alt 并右键单击。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	在与相机和场景旋转点之间的轴正交的平面上移动场景。
按下 Alt 并中键单击。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	沿相机与场景旋转点之间的轴移动相机。
中键单击模型。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	设置旋转中心。
按 X、Y 或 Z 并单击。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同，仅适用于双键鼠标。	分别绕 X、Y 或 Z 轴旋转。
R	R	在手动和自动旋转中心之间切换。

附录 C - 语言元素和保留名称

在 COMSOL Multiphysics 中构建模型树等同于对操作序列进行图形化编程。使用“App 开发器”中的“录制代码”功能或另存为 MATLAB® 或 Java® 模型文件，可以将操作序列输出为传统编程语句列表。在本节中，我们将概述由底层 COMSOL 语言定义的以下元素类别：

- 常数
- 变量
- 函数
- 运算符
- 表达式

这些语言元素是软件内置或用户定义的。运算符不能由用户定义。表达式始终由用户定义。

关于保留名称

内置元素具有保留名称，且这些名称不能由用户重新定义。如果尝试将保留名称用于用户定义的变量、参数或函数，则输入该名称的文本将变为橙色，如果选择该文本字符串，则会看到一条工具提示错误消息。保留函数名称仅针对函数名称保留，即此类名称可用于变量和参数名称，反之亦然。在以下页面中，我们列出了最常用的内置元素以及相应的保留名称。有关更详细的内置元素列表，请参阅 [Programming Reference Manual](#) 和 [Application Programming Guide](#)。

APP 中使用的变量

模型参数和变量可在 App 中使用。例如，您可以让 App 用户更改参数值。此外，还可以在“App 开发器”的声明节点下定义要在 App 中使用的变量。此类变量可以在表单对象和方法中全局使用，但不能用于“模型开发器”。

常数和参数

可以从“模型开发器”访问三种不同类型的常数：内置的数学和数值常数、内置物理常数及参数。参数是用户定义的常数，可随参数扫描而发生变化。常数是标量值。下表列出了内置的数学和数值常数，以及内置物理常数。常数和参数可以有单位。

内置的数学和数值常数

描述	名称	值
双浮点数的浮点相对精度，也称为机器精度	eps	2^{-52} (~2.2204·10 ⁻¹⁶)
虚部单位	i, j	i, sqrt(-1)
无穷大, ∞	inf, Inf	该值大于可用浮点表示法处理的值
非数	NaN, nan	未定义或无法表示的值，例如 0/0 或 inf/inf 的结果
π	pi	3.141592653589793

内置物理常数

描述	名称	值
重力加速度	g_const	9.80665[m/s ²]
阿伏伽德罗常数	N_A_const	6.02214129e23[1/mol]
玻尔兹曼常数	k_B_const	1.3806488e-23[J/K]
真空特性阻抗（自由空间阻抗）	Z0_const	376.73031346177066[ohm]
电子质量	me_const	9.10938291e-31[kg]
元电荷	e_const	1.602176565e-19[C]
法拉第常数	F_const	96485.3365[C/mol]
精细结构常数	alpha_const	7.2973525698e-3
万有引力常数	G_const	6.67384e-11[m ³ /(kg*s ²)]
理想气体摩尔体积（在 273.15 K 和 1 atm 时）	V_m_const	2.2413968e-2[m ³ /mol]
中子质量	mn_const	1.674927351e-27[kg]
真空磁导率（磁常数）	mu0_const	4*pi*1e-7[H/m]
真空介电常数（电常数）	epsilon0_const	8.854187817000001e-12[F/m]
普朗克常数	h_const	6.62606957e-34[J*s]
普朗克常数除以 2 pi	hbar_const	1.05457172533629e-34[J*s]
质子质量	mp_const	1.672621777e-27[kg]
真空中的光速	c_const	299792458[m/s]
斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数	sigma_const	5.670373e-8[W/(m ² *K ⁴)]
通用气体常数	R_const	8.3144621[J/(mol*K)]
维恩位移定律常数	b_const	2.8977721e-3[m*K]

参数

参数是在模型树的全局定义分支中由用户定义的常数标量。使用的示例包括：

- 参数化几何尺寸
- 参数化网格单元大小
- 定义要在参数化扫描中使用的参数

参数可根据数字、参数、内置常数，以及参数和内置常数的内置函数定义为表达式。除非参数是无量纲的，否则应使用 [] 指派一个单位。

变量

“模型开发器”中使用两种类型的变量：内置变量和用户定义的变量，可以为标量或场，并能包含单位。

注：空间坐标变量和因变量是用户根据需要定义的变量。这些变量具有默认名称，分别基于几何空间维度和物理场接口。根据为这些变量选择的名称，COMSOL Multiphysics 将创建一组内置变量：相对于空间和时间的一阶和二阶导数。

内置变量

名称	描述	类型
curv	二维边界曲率	场
curv1,curv2	三维边界的主曲率分量	场
dom	域、边界、边或点的域编号	场
dvol	体积比例因子变量；这是从局部（单元）坐标映射到全局坐标的雅可比矩阵行列式。	场
freq	频率	全局变量
h	网格单元大小（单元最长边的长度）	场
lambda	特征值	全局变量
linearizedelem	强制为线性的单元	场
numberofdofs	自由度数	全局变量
meshtype	网格单元的网格类型索引；它是单元的边数。	场
meshelement	网格单元数	场
meshvol	（线性化）单元的体积	场
nx,ny,nz	边界法向分量	场
phase	相角	全局变量
qual	网格质量	场
realdetjac	从平直网格单元映射到求解时所用可能弯曲的单元的雅可比矩阵行列式。使用此变量可以测量弯曲单元与对应的平直单元之间的形状差异。	场

<code>reldetjacmin</code>	每个单元的标量场变量，这些单元已定义为相应单元的 <code>reldetjac</code> 变量的最小值。 如果单元的 <code>reldetjacmin</code> 值小于零，则意味着该单元由内向外翻转；也就是说，该单元是反转的网格单元。	场
<code>s, s1, s2</code>	曲线和曲面参数化变量	场
<code>t</code>	时间	全局变量
<code>tcurvx, tcurvy, tcurv1x, curv1y, tcurv1z, tcurv2x, tcurv2y, tcurv2z</code>	相应曲率变量的切向分量	场
<code>tx, ty, t1x, t1y, t1z, t2x, t2y, t2z</code>	对应于曲线和曲面参数化的切矢分量	场
<code>qual</code>	介于 0（质量差）和 1（质量完美）之间测量的网格质量	场

用于生成内置变量的用户定义变量

默认名称	描述	类型
<code>x, y, z</code>	空间坐标（笛卡尔）	场
<code>r, phi, z</code>	空间坐标（柱面）	场
<code>u, T</code> 等	因变量（解）	场

示例：`T` 是二维瞬态传热模型中的温度名称；`x` 和 `y` 是空间坐标名称。在这种情况下，将生成以下内置变量：`T`、`Tx`、`Ty`、`Txx`、`Txy`、`Tyx`、`Tyy`、`Tt`、`Txt`、`Tyt`、`Txxt`、`Txyt`、`Tyxt`、`Tyyt`、`Ttt`、`Txtt`、`Tytt`、`Txxtt`、`Txytt`、`Tyxtt` 及 `Tyytt`。其中，`Tx` 对应于温度 `T` 对 `x` 的偏导数，`Ttt` 对应于 `T` 的二阶时间导数，以此类推。如果空间坐标变量具有其他名称（例如，`psi` 和 `chi`），则 `Txy` 将变为 `Tpsichi`，且 `Txt` 将变为 `Tpsit`。（时间变量 `t` 是内置的；用户不能更改其名称。）

函数

在“模型开发器”中，有两种类型的函数：内置函数和用户定义的函数。函数可以是标量值或与输入变元相关的场值。某些函数的输入和输出变元都可以有单位。

内置数学函数

这些函数的输入或输出变元没有单位。

名称	描述	语法示例
abs	绝对值	abs(x)
acos	反余弦（以弧度计）	acos(x)
acosh	反双曲余弦	acosh(x)
acot	反余切（以弧度计）	acot(x)
acoth	反双曲余切	acoth(x)
acsc	反余割（以弧度计）	acsc(x)
acsch	反双曲余割	acsch(x)
arg	相角（以弧度计）	arg(x)
asec	反正割（以弧度计）	asec(x)
asech	反双曲正割	asech(x)
asin	反正弦（以弧度计）	asin(x)
asinh	反双曲正弦	asinh(x)
atan	反正切（以弧度计）	atan(x)
atan2	四象限反正切（以弧度计）	atan2(y,x)
atanh	反双曲正切	atanh(x)
besselj	第一类贝塞尔函数	besselj(a,x)
bessely	第二类贝塞尔函数	bessely(a,x)
besseli	第一类修正贝塞尔函数	besseli(a,x)
besselk	第二类修正贝塞尔函数	besselk(a,x)
ceil	向上舍入为最接近的整数	ceil(x)
conj	共轭复数	conj(x)
cos	余弦	cos(x)
cosh	双曲余弦	cosh(x)
cot	余切	cot(x)

名称	描述	语法示例
coth	双曲余切	coth(x)
csc	余割	csc(x)
csch	双曲余割	csch(x)
erf	误差函数	erf(x)
exp	指数	exp(x)
floor	向下舍入为最接近的整数	floor(x)
gamma	伽马函数	gamma(x)
imag	虚部	imag(u)
log	自然对数	log(x)
log10	以 10 为底的对数	log10(x)
log2	以 2 为底的对数	log2(x)
max	两个变元的最大值	max(a,b)
min	两个变元的最小值	min(a,b)
mod	模运算符	mod(a,b)
psi	Psi 函数及其导数	psi(x,k)
range	创建指定范围的数	range(a,step,b)
real	实部	real(u)
round	舍入为最接近的整数	round(x)
sec	正割	sec(x)
sech	双曲正割	sech(x)
sign	符号函数	sign(u)
sin	正弦	sin(x)
sinh	双曲正弦	sinh(x)
sqrt	平方根	sqrt(x)
tan	正切	tan(x)
tanh	双曲正切	tanh(x)

内置运算符函数

这些内置函数的行为与内置数学函数不同。它们可能不属于介绍性文本范畴，但在此列出以保证保留名称列表的完整性。有关更多信息，请参阅 Reference Manual。

名称	名称	名称	名称
adj	dtang	mean	timeavg
at	emetric	noenv	timeint
atlocal	env	nox	timemax
attimemax	error	pd	timemin
attimemin	fsens	ppr	treatasconst
atxd	fsensimag	pprint	try_catch
atonly	if	prev	uflux
ballavg	integrate	reacf	up
ballint	isdefined	realdot	var
bdf	isinf	residual	with
bndenv	islinear	<i>scope.atenti</i>	withsol
centroid	isnan	<i>scope.ati</i>	
circavg	jacdepends	sens	
circint	lindev	setconst	
circumcenter	linper	setind	
d	linpoint	setval	
depends	linsol	shapeorder	
dest	lintotal	side	
dflux	lintotalavg	sphavg	
diskavg	lintotalpeak	sphint	
diskint	lintotalrms	subst	
down	linzero	sum	
dtang	nojac	test	

用户定义的函数

用户定义的函数可以在模型树的**全局定义**节点下（对于每个**组件**，则在**定义**节点下）定义。从**函数**菜单中选择一个模板并输入设置，定义函数的名称和详细形状。

模板名称	变元和定义	语法示例
解析	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 an1。</p> <p>该函数是其变元的数学表达式。</p> <p>示例：给定变元 x 和 y，其定义为 sin(x)*cos(y)。</p> <p>该函数具有任意数量的变元。</p>	<p>函数名称与括号内逗号分隔的变元。例如：</p> <p>an1(x,y)</p>
高程	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 elev1。</p> <p>用于从数字高程模型中导入地理空间高程数据，并将高程数据映射为 x 和 y 的函数。DEM 文件包含地球表面一部分的高程数据。结果函数的行为基本上类似于基于栅格的插值函数。</p>	<p>函数名称与括号内逗号分隔的变元。例如：</p> <p>elev1(x,y)</p>
高斯脉冲	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 gp1。</p> <p>高斯脉冲函数根据表达式定义一条钟形的曲线</p> $y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ <p>该函数由平均参数 x₀ 和标准差 σ 定义。</p> <p>该函数具有一个变元。</p>	<p>函数名称与括号内的单个变元。例如：</p> <p>gp1(x)</p>

模板名称	变元和定义	语法示例
图像	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 im1。</p> <p>用于导入图像（BMP、JPEG、PNG 或 GIF 格式），并将图像的 RGB 数据映射到一个标量（单通道）函数输出值。默认情况下，该函数的输出使用映射 $(R+G+B)/3$。</p>	<p>函数名称与括号内逗号分隔的变元。例如：</p> <p>im1(x,y)</p>
插值	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 int1。</p> <p>插值函数由包含离散点函数值的表格或文件定义。</p> <p>文件格式如下：电子表格、网格或分段。</p> <p>该函数具有一到三个变元。</p>	<p>函数名称与括号内逗号分隔的变元。例如：</p> <p>int1(x,y,z)</p>
分段	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 pw1。</p> <p>分段函数通过将多个函数（每个函数在一个区间中定义）拼接在一起进行创建。定义变元、外推和平滑方法，以及函数及其区间。</p> <p>该函数具有一个变元，该变元在不同区间具有不同的定义，它们不得重叠或有任何间断。</p>	<p>函数名称与括号内的单个变元。例如：</p> <p>pw1(x)</p>
斜坡	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 rm1。</p> <p>斜坡函数呈线性增加，其用户定义的斜率在某个指定的时间开始。</p> <p>该函数具有一个变元。它也可以进行平滑。</p>	<p>函数名称与括号内的单个变元。例如：</p> <p>rm1(x)</p>

模板名称	变元和定义	语法示例
随机	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 rn1。</p> <p>随机函数可生成均匀或正态分布的白噪声，并包含一个或多个变元来模拟白噪声。</p> <p>该函数具有任意数量的变元。</p>	<p>函数名称与括号内逗号分隔的变元。例如：</p> <p>rn1(x,y)</p> <p>变元 x 和 y 用作随机函数的随机种子。</p>
方波	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 rect1。</p> <p>方波函数在某个区间中为 1，而在其他任意位置均为 0。</p> <p>该函数具有一个变元。</p>	<p>函数名称与括号内的单个变元。例如：</p> <p>rect1(x)</p>
阶跃	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 step1。</p> <p>阶跃函数会在某个位置从 0 突变为其他某个值（幅值）。</p> <p>该函数具有一个变元。它也可以进行平滑。</p>	<p>函数名称与括号内的单个变元。例如：</p> <p>step1(x)</p>
Switch	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 sw1。</p> <p>switch 用于在求解器扫描过程中在全局函数之间进行切换。这类函数可以在 Switch 节点下作为子节点进行添加。本质上，函数切换在编程语言中用作切换语句；也就是说，它根据可使用“函数扫描”研究从求解器控制的参数来动态选择其基础分支之一。也可以在“材料”下添加 Switch 节点，然后使用“材料扫描”来扫描一组离散材料。</p>	<p>Switch 是函数的容器节点。</p>

模板名称	变元和定义	语法示例
三角波	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 tri1。</p> <p>三角波函数在某个区间内呈线性增加或线性下降，而在其他任意位置均为 0。</p> <p>该函数具有一个变元。它也可以进行平滑。</p>	<p>函数名称与括号内的单个变元。例如：</p> <p>tri1(x)</p>
波形	<p>函数名称即为该函数的标识符，例如 wv1。</p> <p>波形函数是周期函数，具有以下多个特性形状之一：锯齿波、正弦波、方波或三角波。</p> <p>该函数具有一个变元。它也可以进行平滑。</p>	<p>函数名称与括号内的单个变元。例如：</p> <p>wv1(x)</p>
外部 (仅全局定义)	<p>外部函数可定义用 C 语言编写的一个或多个函数的接口（可以是诸如 Fortran 等编写的包裹函数接口源代码）。例如，可以使用此类外部函数来对接用户创建的共享库。请注意，共享库文件的扩展名取决于操作平台：.dll (Windows)、.so (Linux) 或 .dylib (macOS)。</p>	<p>函数名称与括号内相应数量的变元。例如：</p> <p>myextfunc(a,b)</p>
MATLAB [®] (仅全局定义)	<p>MATLAB[®] 函数对接一个或多个以 MATLAB[®] 语言编写的函数。此类函数可用作 COMSOL Multiphysics 中定义的其他任何函数，前提是已安装 LiveLink[™] for MATLAB[®] 和 MATLAB[®]。（MATLAB[®] 函数由 MATLAB[®] 在运行时计算。）</p>	<p>函数名称与括号内相应数量的变元。例如：</p> <p>mymatlabfunc(a,b)</p>

一元和二元运算符

在“模型开发器”中，下表包含可在表达式中使用的一元和二元运算符。

优先级	符号	描述
1	() {} .	分组、列表、范围
2	^	幂
3	! - +	一元：逻辑非、差、和
4	[]	单位
5	* /	乘法、除法
6	+ -	二元：加法、减法
7	< <= > >=	比较：小于、小于等于、大于、大于等于
8	== !=	比较：等于、不等于
9	&&	逻辑与
10		逻辑或
11	,	列表中的元素分隔符

表达式

参数

参数表达式可以包含：数字、参数、内置常数、参数表达式的内置函数，以及一元和二元运算符。参数可以有单位。

变量

变量表达式可以包含：数字、参数、常数、变量、变量表达式的函数，以及一元和二元运算符。变量可以有单位。

函数

函数定义可以包含：输入变元、数字、参数、常数、含输入变元的参数表达式的函数，以及一元和二元运算符。

附录 D - 文件格式

COMSOL 文件格式

COMSOL 模型 MPH 文件类型的扩展名为 **.mph**，这是默认的文件类型，包含整个模型树以及“模型开发器”和“App 开发器”中的 App 树。该文件包含二进制和文本数据。网格和解数据以二进制数据形式存储，而其他所有信息均以纯文本形式存储。

COMSOL 二进制和文本文件类型（扩展名分别为 **.mphbin** 和 **.mphtxt**）包含几何对象或网格对象，这些对象可直接导入模型树的几何或网格节点。请注意，如果使用了“CAD 导入模块”或“设计模块”中的一种产品、或 CAD 的其中一个 LiveLink™ 附加产品来创建几何模型，则需要相同的产品才能打开对应的文件。原因是几何模型可能需要其中一种附加产品特有的特征。

“物理场开发器”文件类型（扩展名为 **.mphphb**）包含可从“模型开发器”访问的一个或多个用户定义的物理场接口。有关更多信息，请参阅 [Physics Builder Manual](#)。

有关 COMSOL Multiphysics 支持的所有其他格式的更多信息，请参见[支持的外部文件格式](#)。

文件类型	扩展名	读	写
COMSOL 模型和 App	.mph	是	是
二进制数据	.mphbin	是	是
物理场开发器	.mphphb	是	是
文本数据	.mphtxt	是	是

支持的外部文件格式

CAD

“CAD 导入模块”和“设计模块”可供导入一系列行业标准的 CAD 文件类型。其他文件类型可通过 CAD 的 LiveLink 产品的双向功能和 CATIA® V5 插件的“文件导入”来进行导入。

DXF（二维）、VRML（三维）和 STL（三维）文件类型可以使用 COMSOL Multiphysics 来导入，而无需任何附加产品。除非另有说明，在所有支持的 Linux®、macOS 和 Windows® 操作系统版本中，均可导入下表列出的文件类型。

文件类型	扩展名	读	写
AutoCAD® ^{1,2,3}	.dwg	是	是 ⁹
Inventor® ^{1,2,3}	.ipt, .iam	是	是 ⁹
NX® ^{1,4}	.prt	是	否
PTC® Creo® Parametric™ ^{1,3}	.prt, .asm	是	是 ⁹
PTC® Pro/ENGINEER® ^{1,3}	.prt, .asm	是	是 ⁹
Revit® Architecture ^{3,5}	.rvt	是 ⁹	是 ⁹
Solid Edge® ^{3,6}	.par, .asm	是 ⁹	是 ⁹
SOLIDWORKS® ^{1,2,3}	.sldprt, .sldasm	是	是 ⁹
DXF（3D ^{1,2} 和 2D）	.dxf	是	是 ¹⁰
Parasolid® ¹	.x_t, .xmt_txt, .x_b, .xmt_bin	是	是
ACIS® ¹	.sat, .sab, .asat, .asab	是	是
STEP ¹	.step, .stp	是	否
IGES ¹	.iges, .igs	是	否
CATIA® V5 ^{2,7}	.CATPart, .CATProduct	是	否
VRML, v1 ⁸	.vrm1, .wr1	是	否

文件类型	扩展名	读	写
STL	.stl	是	是

¹ 需要以下任一款 LiveLink™ 产品：AutoCAD®、Revit®、PTC® Creo® Parametric™、Inventor®、PTC® Pro/ENGINEER®、Solid Edge®、SOLIDWORKS®、“CAD 导入模块”或“设计模块”

² 仅支持在 Windows® 操作系统下导入

³ 仅 Windows® 7、8、8.1 和 10 操作系统支持在 COMSOL Multiphysics 与链接的 CAD 程序之间同步文件

⁴ 仅支持在 Windows® 和 Linux 操作系统下导入

⁵ 需要 LiveLink™ *for* Revit®

⁶ 需要 LiveLink™ *for* Solid Edge®

⁷ 需要“CAD 导入模块”（或“设计模块”，或以下任一款 LiveLink™ 产品：AutoCAD®、PTC® Creo® Parametric™、Inventor®、PTC Pro/ENGINEER®、Solid Edge® 或 SOLIDWORKS®）以及 File Import for CATIA® V5

⁸ 限制为单个几何域

⁹ 使用链接的 CAD 软件包读取或写入文件，前提是该 CAD 软件包中已创建原始 CAD 几何

¹⁰ 仅二维几何支持写入文件

ECAD

“ECAD 导入模块”可供导入二维布局文件，并自动转换为三维 CAD 模型。Touchstone 文件类型用于导出来自并行端口和频率扫描的 S 参数、阻抗和导纳值。“SPICE 电路网表”文件类型在导入时会转换为电路节点下的一系列集总电路元件节点。

文件类型	扩展名	读	写
NETEX-G ¹	.asc	是	否
IPC-2581 ¹	.cvg, .xml	是	否
ODB++ ¹	.zip, .tar, .tgz, .tar.gz	是	否
ODB++(X) ¹	.xml	是	否
GDS ¹	.gds	是	否
Touchstone ²	.s2p, .s3p, .s4p, ...	否	是

文件类型	扩展名	读	写
SPICE 电路网表 ³	.cir	是	否

¹ 需要 “ECAD 导入模块”

² 需要以下任一模块：“AC/DC 模块”、“RF 模块”、“MEMS 模块”或“波动光学模块”

³ 需要以下任一模块：“AC/DC 模块”、“RF 模块”、“MEMS 模块”、“等离子体模块”或“半导体模块”

材料数据库

“化学反应工程模块”和“等离子体模块”可以读取 CHEMKIN[®] 文件，模拟气相中的复杂化学反应。“等离子体模块”可以读取一组电子碰撞横截面的 LXCAT 文件。

文件类型	扩展名	读	写
CHEMKIN ^{®1}	.dat, .txt, .inp ³	是	否
CAPE-OPEN ¹ （直接连接）	n/a	n/a	n/a
LXCAT 文件 ²	.lxcat, .txt	是	否

¹ 需要“化学反应工程模块”或“等离子体模块”。“等离子体模块”仅支持热力学和传输数据。

² 需要“等离子体模块”

³ 允许任何扩展名，这些是最常用的扩展名

网格

NASTRAN[®] “模型数据”文件类型用于导入体网格。VRML 和 STL 文件类型用于导入三角形表面网格，不能用于创建体网格。如果导入为“几何”，则 VRML 和 STL 文件可用作创建单个几何域的体网格的基础。

文件类型	扩展名	读	写
NASTRAN [®] 模型数据	.nas, .bdf, .nastran, .dat	是	是
STL	.stl	是	是
VRML, v1	.vrml, .wrl	是	否
VTK	.vtu	否	是

图像和电影

结果可视化可以导出为许多常见的图像文件类型；请参见下表。还可以读取图像并将其用作物理场建模的插值函数。动画可以导出为“动画 GIF”、Adobe® Flash® 及 AVI 文件类型。

文件类型	扩展名	读	写
Adobe® Flash®	.swf	否	是
动画 GIF	.gif	否	是
AVI ¹	.avi	否	是
BMP	.bmp	是	是
EPS（仅支持一维图形）	.eps	否	是
GIF	.gif	是	是
JPEG	.jpg, .jpeg	是	是
MP4 ²	.mp4	是	否
OGV ²	.ogv	是	否
PNG	.png	是	是
TIFF	.tif, .tiff	否	是
WEBM ²	.webm	是	否

¹ 仅适用于 Windows®

² 仅适用于 Windows® 系统中的“App 开发器”中的视频表单对象

编程语言和电子表格

Java® 模型文件是一种可编辑的文件（扩展名为 .java），以 Java® 代码的形式包含 COMSOL 命令序列。在文本编辑器中编辑文件以添加其他命令。可以将这些 Java® 文件编译为 Java® 类文件（扩展名为 .class），并将其作为单独的 App 运行。Java® 模型文件中使用的程序代码与“App 开发器”的“方法编辑器”中的代码基本相同。不过，“方法编辑器”带有集成的 Java® 编译器。

MATLAB® 模型文件是可编辑的脚本文件（M 文件），类似于 Java® 模型文件，供 MATLAB® 使用。这些模型文件（扩展名为 .m）以 MATLAB® M 文件的形式包含 COMSOL 命令序列。像其他任何 M 文件脚本一样，您可以在 MATLAB® 中运行这些模型文件。此外，也可以在文本编辑器中编辑这些文件，以包含其他 COMSOL 命令或常用的 MATLAB® 命令。运行 M 文件格式的模型文件时需要 LiveLink™ for MATLAB®。

通过 LiveLink™ for Excel® 许可证，您可以将模型保存为 Visual Basic for Applications (VBA) 格式，同 Excel® 结合使用。

编译的 C- 代码可通过多种方式链接到模型或 App，包括“模型开发器”中的“外部材料”和“外部函数”接口以及“App 开发器”中的“外部库”接口。

文件类型	扩展名	读	写
MATLAB®: MATLAB® 模型文件	.m	否	是
MATLAB®: 函数 ¹	.m	是	否
Java®: 存档文件	.jar ⁶	是	否
Java®: 编译的 Java® 模型文件	.class	是	否
Java®: Java® 模型文件	.java	否	是
C: 函数	.dll ³ , .so ⁴ , .dylib ⁵	是	否
Fortran ⁷ : 函数	.dll ³ , .so ⁴	是	否
Excel® ²	.xlsx, .vba	是	是

¹ 需要 LiveLink™ for MATLAB®

² 需要 LiveLink™ for Excel®, 仅适用于 Windows®

³ 仅适用于 Windows®

⁴ 仅适用于 Linux®

⁵ 仅适用于 macOS

⁶ 可以使用“App 开发器”链接到 App 中的方法

⁷ 需要 Fortran 代码的 C-wrapper，并在“App 开发器”中包含 C- 代码 DLL 作为“外部 C 库”。或者，也可以在“App 开发器”中直接包含 Fortran DLL 作为“外部 C 库”。注：您需要考虑已导出 Fortran 函数名称的命名约定。例如，在 Windows® 系统中，通常需要 Fortran 函数名称为大写形式。

数值和插值数据格式

网格、分段和电子表格文件类型可被读取并用于定义插值函数。分段和电子表格文件类型可进一步读取，并用于定义插值曲线和写入导出结果。此外，表格可以复制粘贴为电子表格格式。

参数和变量可以导入和导出为纯文本、逗号分隔的值或数据文件类型。

连续和离散颜色表文本文件类型用于将用户定义的颜色表结果可视化。

数字高程模型 (DEM) 文件可以进行读取，并用作定义几何的参数化曲面。

文件类型	扩展名	读	写
复制和粘贴电子表格格式	n/a	是	是
Excel® 电子表格 ¹	.xlsx	是	是
表格	.txt, .csv, .dat	是	是
网格	.txt	是	是
分段	.txt, .csv, .dat	是	是
电子表格	.txt, .csv, .dat	是	是
参数	.txt, .csv, .dat	是	是
变量	.txt, .csv, .dat	是	是
连续和离散颜色表	.txt	是	否
截点数据集的点数据	.txt	是	否
DEM	.dem	是	否
VTK	.vtu	否	是

¹ 需要 LiveLink™ for Excel®, 仅适用于 Windows®

附录 E - 使用 LiveLink™ 附加产品连接

下表显示 COMSOL 的启动选项，以及各种使用 LiveLink™ 附加产品的链接合作伙伴软件。

COMSOL® 软件	可从合作伙伴软件启动 COMSOL	可从 COMSOL 启动合作伙伴软件	可连接正在运行的会话
LiveLink™ for Excel®	是 ¹	是 ²	否
LiveLink™ for MATLAB®	是 ³	是 ⁴	是 ⁵
LiveLink™ for AutoCad®	否	否	是
LiveLink™ for Revit®	否	否	是
LiveLink™ for PTC®Creo® Parametric™	否	否	是
LiveLink™ for Inventor®			
- 双向模式	否	否	是
- 单窗口模式	是	否	否
LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®	否	否	是
LiveLink™ for Solid Edge®	否	否	是
LiveLink™ for SOLIDWORKS®			
- 双向模式	否	否	是
- 单窗口模式	是	否	否

¹ 从 Excel® 打开模型时，会启动模型窗口并自动建立链接。模型窗口是显示几何、网格和结果的输出窗口。

- ² 如果模型包含一个引用 Excel[®] 电子表格的表，则当该模型在 COMSOL Desktop 环境中运行时，会在后台自动启动 Excel[®] 进程。
- ³ 可以使用 **system** 命令从 MATLAB[®] 会话中启动 COMSOL Multiphysics Server，然后在 MATLAB[®] 命令提示符中使用 **mphstart** 来连接它。
- ⁴ “COMSOL with MATLAB[®]” 桌面快捷方式可以启动 COMSOL Multiphysics Server 和 MATLAB[®]，然后自动连接它们。在 COMSOL Desktop 界面中运行包含 MATLAB[®] 函数（全局定义 > 函数）的 COMSOL Multiphysics 模型时，将自动启动 MATLAB[®] 引擎和数据连接。
- ⁵ 可以在 MATLAB[®] 命令提示符中使用命令 **mphstart**，将 MATLAB[®] 会话连接到正在运行的 COMSOL Multiphysics Server。