COMSOL Multiphysics

简介

6.1

COMSOL

COMSOL Multiphysics 简介

© 1998-2022 COMSOL 版权所有

受列于 www.comsol.com/patents 的专利保护；您也可以参见 COMSOL Desktop “文件”菜单中的 “帮助 > 关于 COMSOL Multiphysics”，获取适用的美国专利的简要列表。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》 (www.comsol.com/sla) 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 Compiler、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 www.comsol.com/trademarks。

版本：COMSOL 6.1

联系信息

您可以访问 “联系我们”页面 www.comsol.com/contact，以提交您所需的信息查询，或者搜索我们的联系地址和电话号码。此外，您也可以访问全球销售办事处页面 www.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 www.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：www.comsol.com/support
- 产品下载：www.comsol.com/product-download
- 产品更新：www.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客：www.comsol.com/blogs
- 用户论坛：www.comsol.com/forum
- 活动：www.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心：www.comsol.com/videos
- 技术支持知识库：www.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 38
模型向导 39
几何 41
材料 44
全局定义 45
物理场和边界条件 47
网格 54
研究 56
结果 57
收敛性分析 63
示例 2：母线板 - 多物理场模型 72
模型向导 74
全局定义 77
自动完成和查找工具 78
几何 80
材料 84
物理场和边界条件 90
网格 98
研究 100
结果 101

使用 App 开发器构建 App 109
高级主题概述. 126
高级主题 128
参数、函数、变量和耦合. 128
材料属性和材料库. 133
添加网格. 134
添加物理场. 137
参数化扫描. 159
并行计算. 171
COMSOL Multiphysics 客户端-服务器 175
使用模型管理器 178
创建本地数据库. 178
版本控制. 181
使用模型草稿. 188
比较版本. 194
排除已构建、计算并绘制的数据. 196
在数据库中导入辅助数据. 197
模型管理器工作区. 199
附录 A - 构建几何. 201
附录 B - 键盘和鼠标快捷方式. 218
附录 C - 语言元素和保留名称. 225
附录 D - 文件格式. 241
附录 E - 使用 LiveLink™ 模块实现连接 248

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，本书还简要介绍了如何使用“App 开发器”来创建仿真 App，并提供“模型管理器”的快速介绍。

如果您尚未安装软件，请先访问以下链接下载软件，并按照相关操作说明进行安装：www.comsol.com/product-download。

除本书以外，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”(www.comsol.com/videos) 和“COMSOL 博客” (www.comsol.com/blogs) 页面获取相关资源。

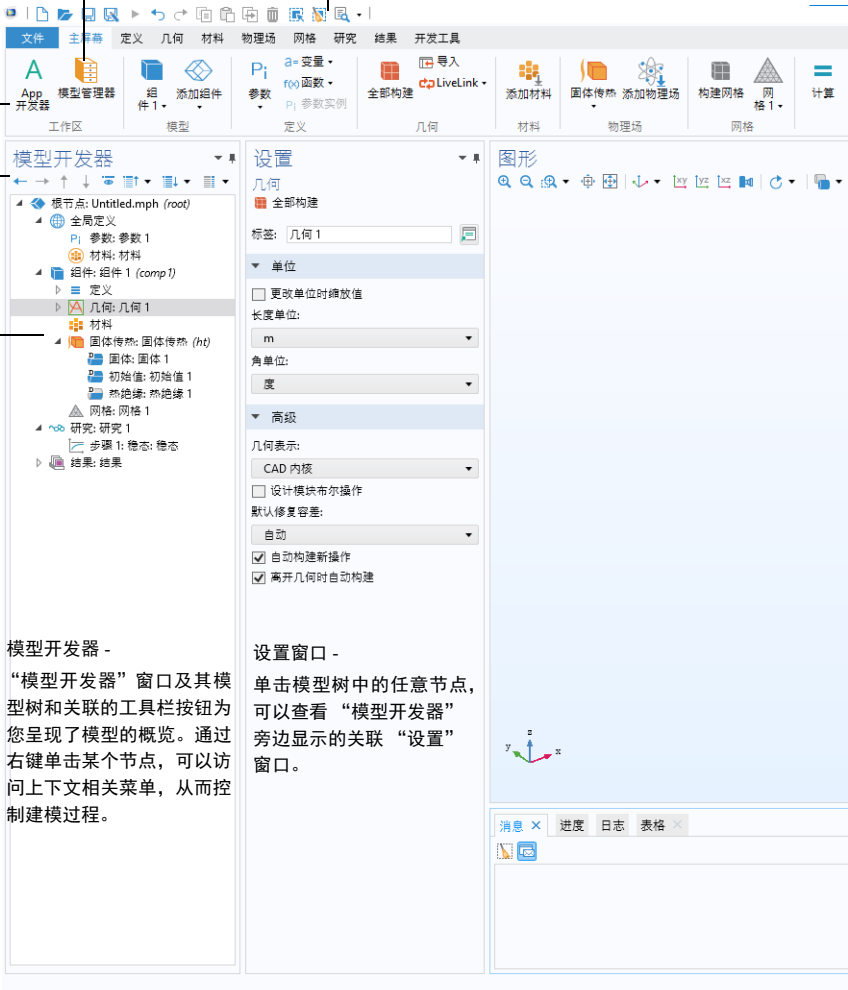
模型管理器 - 单击此按钮可以切换到 “模型管理器”，以管理不同版本的模型。

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。

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。

模型开发器工具栏

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。



模型开发器 -
“模型开发器”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 “模型开发器” 旁边显示的关联 “设置” 窗口。

功能区 - 功能区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。

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，其中包含旋转、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，例如求解时间、求解进度、网格统计信息、求解器日志以及可用的结果表。

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，可以在此访问所需的各种工具。您可以根据需要定制桌面，对窗口进行调整大小、移动、停靠以及分离等操作。当您关闭会话时，COMSOL Multiphysics 会自动保存您对布局所做的所有更改，在下次打开软件时，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 28 页以获取更完善的桌面示例。）您可以使用以下窗口和用户界面组件：

快速访问工具栏

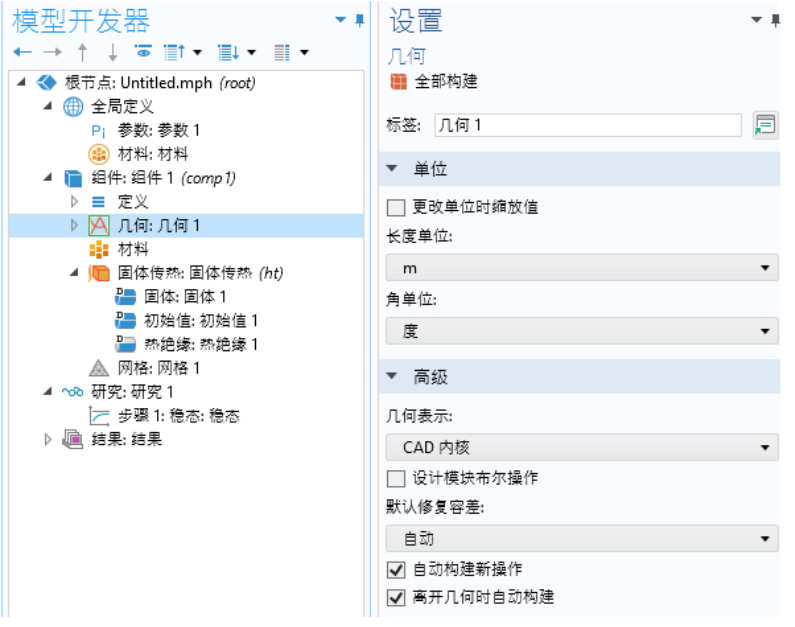
“快速访问工具栏”可供您访问各种功能，例如**打开**、**保存**、**撤消**、**重做**、**复制**、**粘贴**和**删除**。您可以在**定制快速访问工具栏**列表 （工具栏右侧的向下箭头）中定制其内容。

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 macOS 和 Linux® 版本中则由菜单和工具栏代替。单击 **App 开发器**按钮可以从“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，包含几何尺寸、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。您可以使用多个**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，用于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、求解时间和求解器迭代数据。
- **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

您可以通过功能区**主屏幕**选项卡中的**窗口**下拉列表访问所有 COMSOL Desktop 窗口。对于 macOS 和 Linux® 系统，该列表位于**窗口**菜单中。除上述窗口以外，您还可以访问以下窗口：

- **添加物理场**和**添加多物理场**：展开模型中的物理场接口。
- **添加研究**：更改研究类型。
- **添加预定义的绘图**：添加与物理场接口相关的预定义绘图。此类绘图仅适用于某些物理场接口。
- **从库中添加材料**和**材料浏览器**：访问材料属性库。
- **案例库**：从 MPH 文件 （包含教学模型）和可运行 App 及其附属文档的集合中进行选择。
- **零件库**：加载一个预定义的参数化几何模型。
- **插件库**：加载一个提供自定义功能的插件。
- **选择列表**：显示一组当前可供选择的几何对象、域、边界、边和点。
- **属性**：查看模型树节点属性。
- **辅助数据**：查看与模型相关的辅助数据，例如插值文件或 CAD 文件。
- **调试日志**：显示方法的调试信息。
- **表格**：以表格形式显示结果。
- **外部进程**：控制单独运行的 COMSOL Multiphysics 进程。
- **比较结果**：比较两个 MPH 文件的 “模型开发器”和 “App 开发器”设置。
- **查找和替换**：输入搜索字符串，以便在模型的设置、标记、标签、表格等位置进行查找。
- **版本**：显示存储在 “模型管理器”数据库中的模型版本。
- **恢复文件**：查看恢复文件。
- **物理场开发器管理器**：编译用户定义的物理场接口。该窗口仅当您在**首选项**中激活 “物理场开发器”时可见。

带取消按钮的进度条

进度条位于 COMSOL Desktop 界面的右下角，其中包含用于取消当前计算 （如果正在进行）的按钮。

动态帮助

帮助窗口提供有关窗口和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、 App 开发器和模型管理器

COMSOL Desktop 环境的主要组成部分包括“模型开发器”、“App 开发器”和“模型管理器”。

模型开发器

“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。您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

借助 “App 开发器”，您可以通过易于使用的专业用户界面快速创建一个应用程序 （也称为 App）。该 App 通常基于在 “模型开发器”中创建的模型进行创建。“App 开发器”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、图形窗口和按钮。“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。此外，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，可用于修改“模型开发器”和“App 开发器”中的模型对象数据结构。方法既可用于修改当前会话的模型对象，也可用于修改正在运行的 App 中的模型对象。如需获取 “App 开发器”的简介，请参见第 109 页的 “使用 App 开发器构建 App”。

模型管理器

“模型管理器”是用于仿真数据管理的工作区，允许您与其他用户协作，并集中组织模型和 App。其中提供版本控制来跟踪文件的更改和更新，可以帮助您仅存储 MPH 文件草稿和修订版的相关数据。“模型管理器”包含一个高级搜索工具，您可以根据关键字或标记搜索存储在“模型管理器”数据库中的模型和 App 的内容。此外，还可以根据自己的许可证类型，连接到本地或远程 “模型管理器”数据库。如需获取 “模型管理器”的简介，请参见第 178 页的 “使用模型管理器”。

延伸阅读

本 《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”和 “模型管理器”。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》和 *Application Programming Guide*。有关 “模型管理器”的更多信息，请参阅 *Reference Manual* 和 *Model Manager Manual*。

App、 COMSOL Server™ 和 COMSOL Compiler™

“App 开发器”在 Windows® 版本的 COMSOL Multiphysics 中提供。如果您拥有 COMSOL Multiphysics 许可证，则可以在 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，但仍可以通过这些平台上的 COMSOL Multiphysics 来运行。

如果您拥有 COMSOL Server™ 许可证，便可在各种操作系统和硬件平台的主流网页浏览器中运行 App。此外，还能通过易于安装的 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（此功能在通过网页浏览器运行 App 时不可用）。

在网页浏览器中运行 App 时无需进行任何安装，也不需要任何插件，支持一维、二维和三维交互式图形；其中，三维图形渲染基于所有主流网页浏览器都采用的 WebGL™ 技术。此外， Google Play™ 商店还提供适用于 Android® 平台的 COMSOL Client 版本。

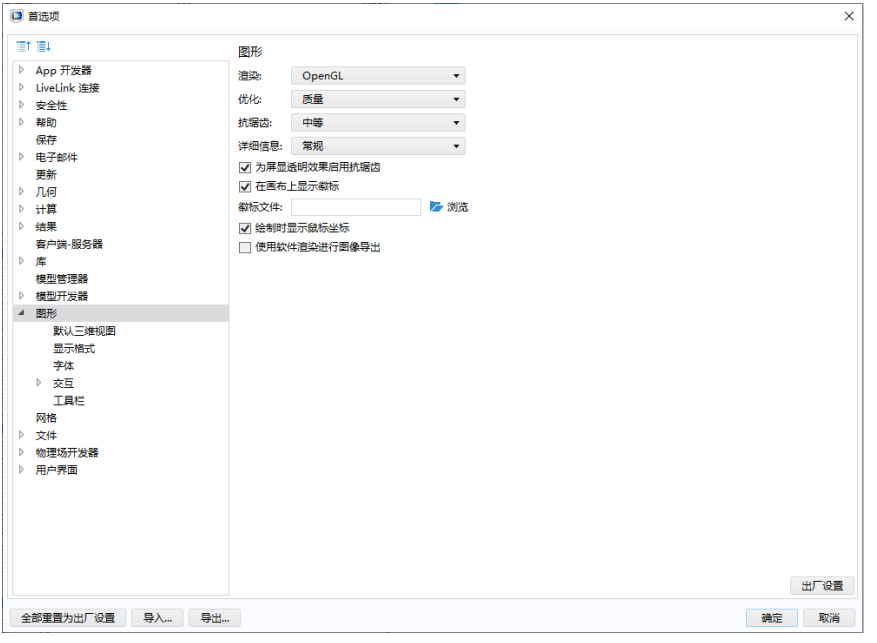
您可以在功能区**主屏幕**选项卡中单击 **App 开发器**按钮，以基于模型创建 App。

您可以使用 COMSOL Compiler™ 将 App （MPH 文件）编译成支持 Windows®、Linux® 和 macOS 操作系统的可执行文件，并将编译后的可执行文件自由分发给其他人使用，他们无需任何许可证文件就能运行这些可执行文件。

有关创建 COMSOL App 的更多信息，请参阅第 109 页的 “使用 App 开发器构建 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。您可以通过从**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 内核数或用户定义的案例库路径。请花一些时间浏览当前设置，以快速熟悉各种不同的选项。

图形和绘图窗口

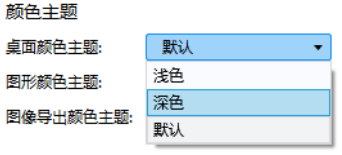
图形页面提供三个图形渲染选项：**OpenGL**®、 **DirectX**® 和**软件渲染**。 **DirectX**® 选项在 macOS 或 Linux® 中不可用，但在 Windows® 系统中，如果您在安装过程中选择了安装 DirectX® 运行库，则可以使用该选项。如果计算机没有专用显卡，则可能需要切换至**软件渲染**，以获取相对较慢但完整的图形功能。请访问以下链接，获取建议的显卡列表：

www.comsol.com/system-requirements

颜色主题

用户界面 > 颜色主题页面提供三个颜色主题首选项：

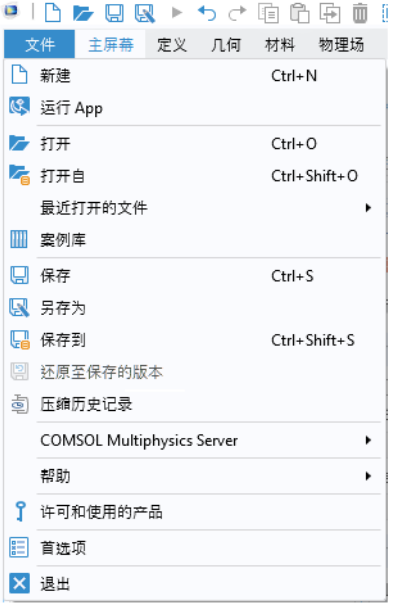
- **桌面颜色主题**：为 COMSOL Desktop 环境选择**默认**、**浅色**或**深色**主题。
- **图形颜色主题**：为**图形**窗口选择一种颜色主题。
- **图像导出颜色主题**：为导出的图像选择一种颜色主题。



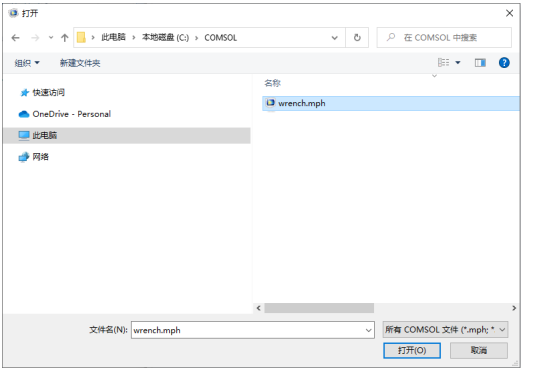
在 Linux® 中使用**深色**主题时，某些控件会采用操作系统主题的颜色。为了获得更好的用户体验，您可以在 Linux® 中选取一种颜色较深的主题，与 COMSOL Desktop 环境中的**深色**主题搭配使用。

在文件菜单中打开和保存文件

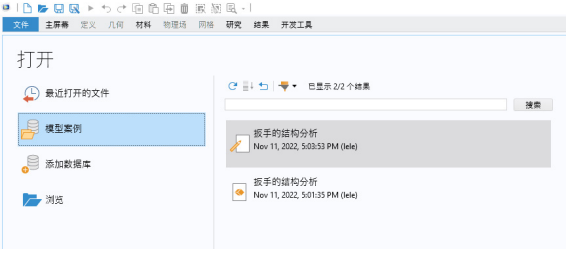
文件菜单提供多个选项，用于以 COMSOL MPH 文件格式和其他一些支持的格式打开和保存模型文件。



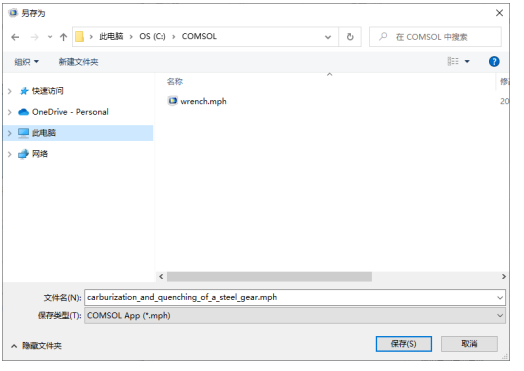
- **新建**：用于从头开始创建新模型。
- **运行 App**：如果选定的 MPH 文件中存在可运行的 App 定义，则打开并运行该 App。
- **打开**：使用**打开**对话框从文件系统中打开现有的文件。



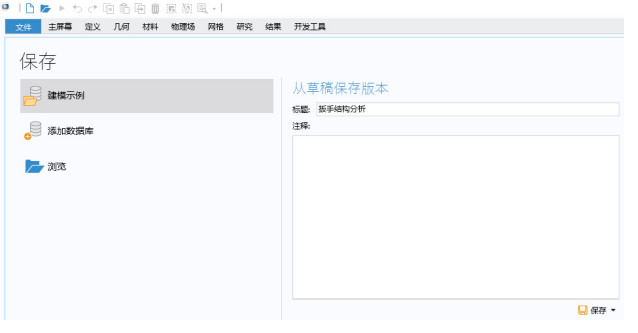
- **打开自**：从文件系统或“模型管理器”数据库中打开现有的文件（请参见第 178 页的“使用模型管理器”）。



- **最近打开的文件**：从文件系统或“模型管理器”数据库中打开一个最近打开的文件。
- **案例库**：从“案例库”中打开教学模型或可运行的 App。
- **保存**：保存当前文件。
- **另存为**：您可以使用**另存为**对话框将当前文件以新的名称保存到文件系统。



- **保存到**：可以保存到“模型管理器”数据库。



- **还原至保存的版本**：打开最后保存的文件版本并重新初始化用户界面。

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。

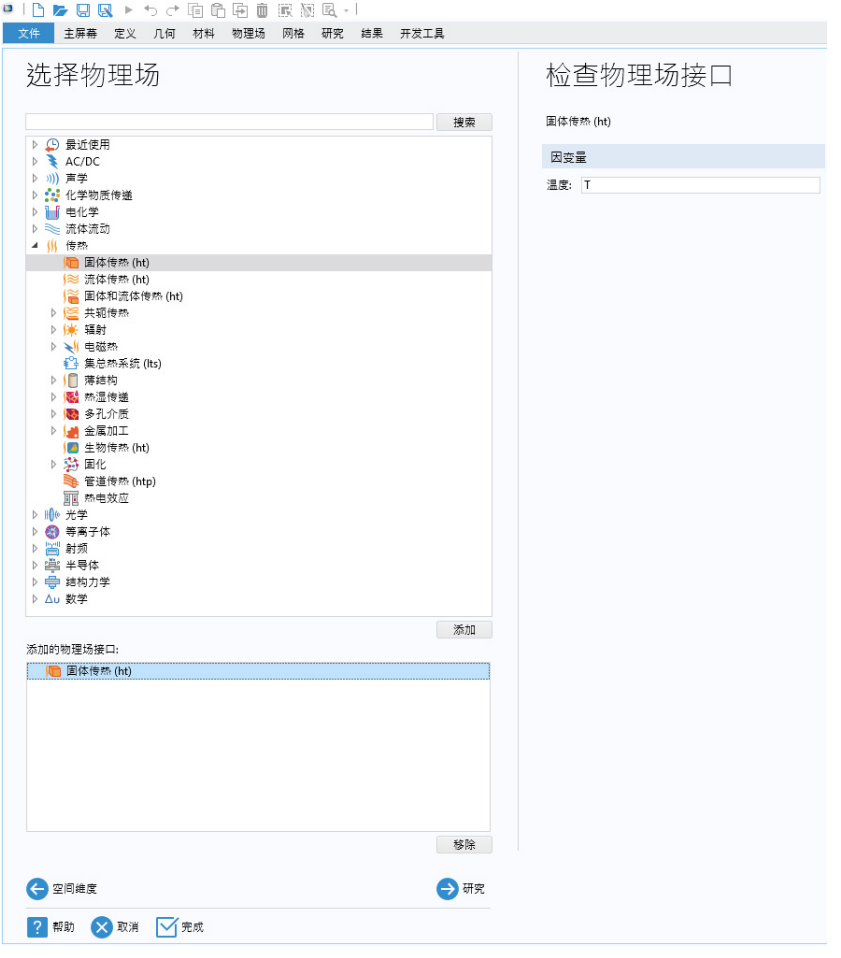
遵循模型向导创建模型

“模型向导”将引导您设置空间维度、物理场和研究类型，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分支进行分类，方便您轻松查找。这些分支并不直接与产品模块相对应。在 COMSOL

Multiphysics 安装中添加产品模块时，一个或多个分支下会增列附加的物理场接口。



3 选择**研究**类型，这些研究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。您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、快速访问工具栏和图形菜单

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可能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

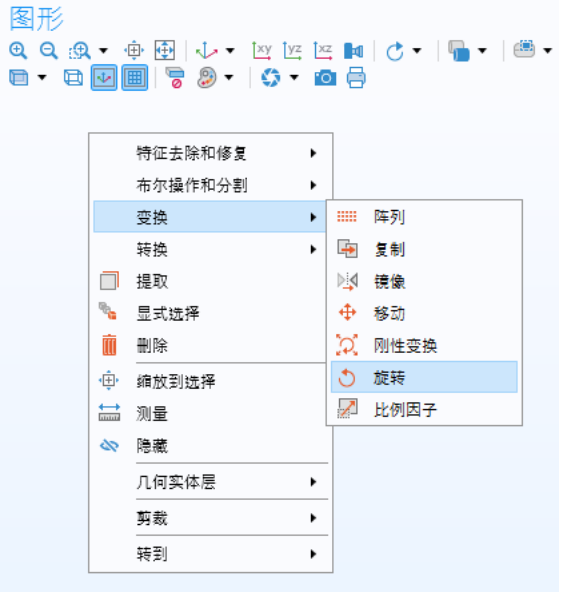
功能区用于快速访问各种命令，并对**模型开发器**窗口中的模型树进行补充。功能区提供的大部分功能也可以通过右键单击模型树中的节点，从弹出的上下文菜单进行访问。某些操作只能通过功能区实现，例如选择显示哪个桌面窗口。在 macOS 和 Linux® 系统的 COMSOL Desktop 界面中，使用工具栏代替功能区提供此功能。此外，也有一些操作只能在模型树中实现，例如重新排序和禁用节点等。

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操作、复制、粘贴、复制粘贴以及删除模型树中的节点等命令。此外，还可以选择将**快速访问工具栏**置于功能区的上方或下方。

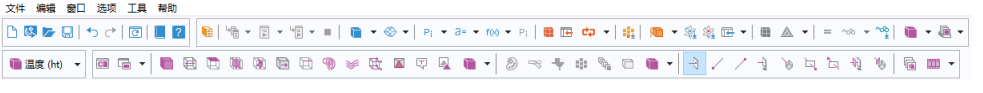
图形菜单

您可以通过以下替代方法来使用模型树或功能区：右键单击**图形**窗口来访问上下文相关菜单，显示的菜单将取决于模型树中当前选择的节点。通过使用**转到**选项（如果可用），可以跳转到模型树中其他节点的上下文菜单。



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。然而，在 macOS 和 Linux® 上，COMSOL Multiphysics 和 COMSOL Desktop 环境的运行方式非常相似；请记住，您可以在相应的菜单和工具栏中找到功能区用户界面组件。此外，仅 Windows® 版本支持 “App 开发器”，不过，您可以在所有支持的操作系统上运行 App。

模型开发器和模型树

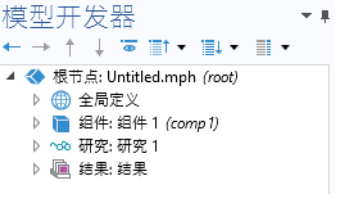
使用 “模型开发器”时，可通过以下操作开始构建模型：在默认的模型树中添加节点并编辑节点设置。

默认模型树中的所有节点均为顶层父节点。您可以右键单击这些节点以查看可以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。

当您单击某个子节点时，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。

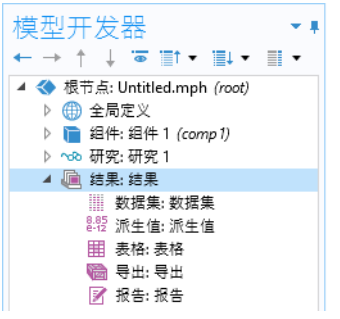
根节点、全局定义和结果节点



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；节点设置中包含作者姓名、默认单位制等。

默认情况下，**全局定义**节点包含**参数**和**材料**子节点，用于定义可在整个模型树中使用的参数、变量、函数及耦合等。例如，可用于定义材料属性、力、几何以及其他相关特征的值和函数依赖关系。**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，可以在模型的**组件**节点中引用。

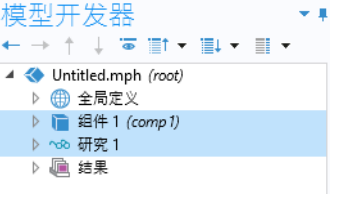
结果节点用于访问通过执行仿真得到的解，其中还提供多个数据处理工具。**结果**节点最初包含五个子节点：



- **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视解。
- **导出**：定义要导出至文件的数值数据、图像及动画。
- **报告**：收集有关模型的报告，格式为 HTML、 Microsoft® Word 和 Microsoft® PowerPoint。

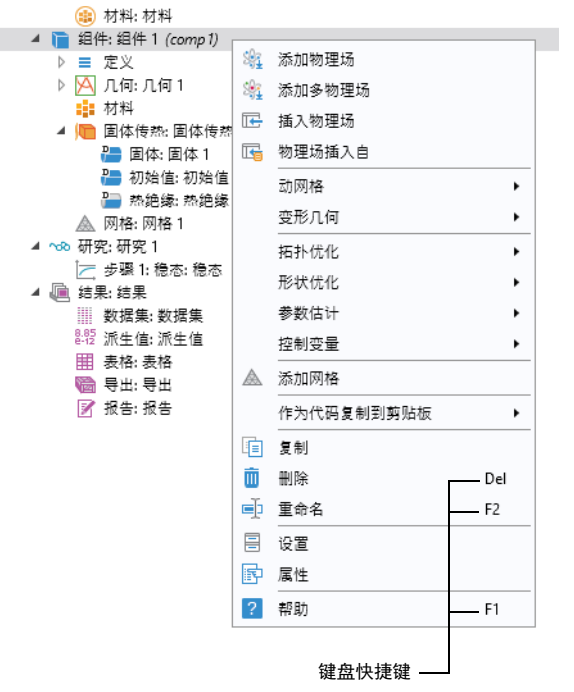
除了这五个默认子节点，您还可以添加更多**绘图组**子节点，用于定义要在**图形**或**绘图**窗口中显示的图形。其中一些节点可根据所执行的仿真类型自动创建，您也可以通过右键单击**结果**节点并从绘图类型列表中进行选择来包含其他图形。不仅如此，您还可以添加**计算组**节点 （与**派生值**节点相似，但具有紧密关联的**计算组**表）和**参数**节点 （用于**结果**中专用的参数）。

组件和研究节点



除上述三个节点以外，还有其他两类顶层节点：**组件**节点和**研究**节点。这些节点通常在建立新的模型时通过“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，可能会造成混淆。因此，您可以根据这些节点类型各自的用途将其重命名。



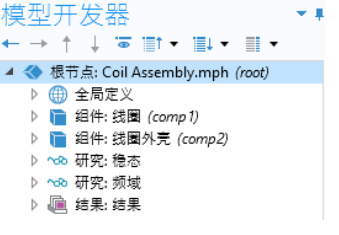
如果模型包含多个**组件**节点，可以将其耦合到一起，形成一系列更为复杂的仿真步骤。

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，假设您要构建一个用于模拟由线圈及其外壳两部分组成的线圈装配的模型，可以创建两个**组件**节点：其中一个对线圈进行建模，另一个对线圈外壳建模。然后，可以使用对象名称来重命名每个节点。同样，您也可以创建两个**研究**节点，第一个用来模拟装配的静态或稳态特性，第二个用来模拟频率响应。您可以将这两个节点重命名为**稳态**和**频域**。

完成模型后，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`，表示用于保存模型的文件名。**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

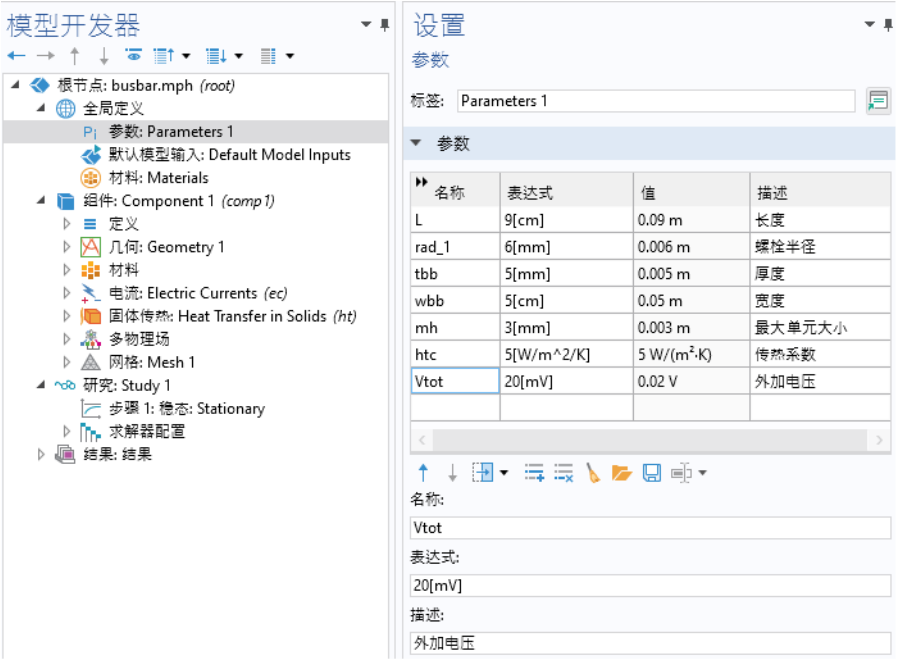
全局参数是用户定义的常量标量，可以在整个模型中使用。也就是说，这些参数具有 “全局”性质，其重要用途包括：

- 参数化几何尺寸。
- 指定网格单元大小。
- 定义参数化扫描 （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的函数，以及一元和二元运算符。有关可用运算符的列表，请参见第 225 页的“附录 C - 语言元素和保留名称”。由于这些表达式在仿真开始前进行计算，因此全局参数不能依赖于时间变量 t。同样，它们也不能依赖于 x、 y 或 z 等空间变量，或依赖于方程要求解的因变量。

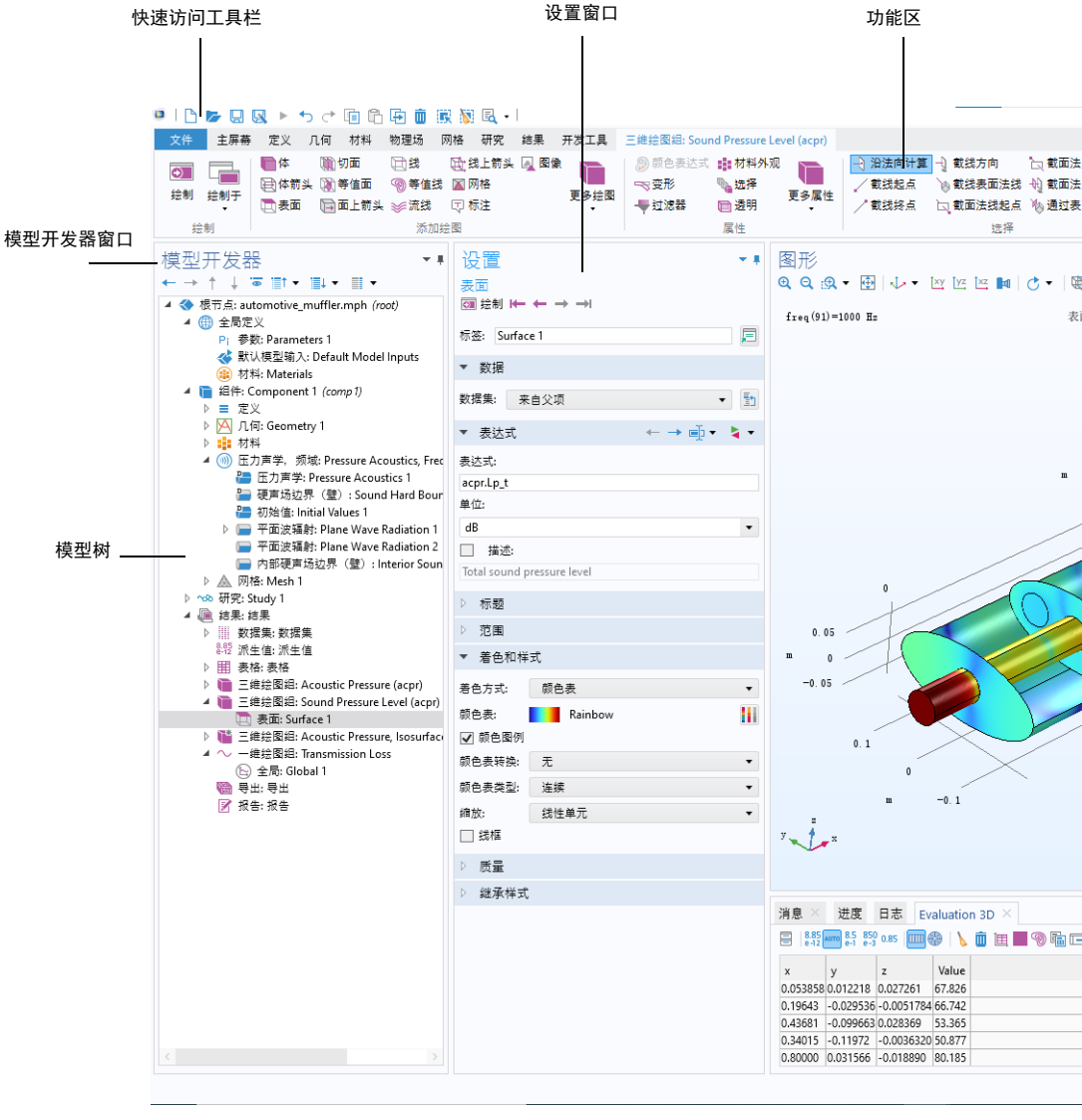
请注意，参数名称区分大小写。

您可以在模型树的**全局定义**下的**参数**节点中定义全局参数。



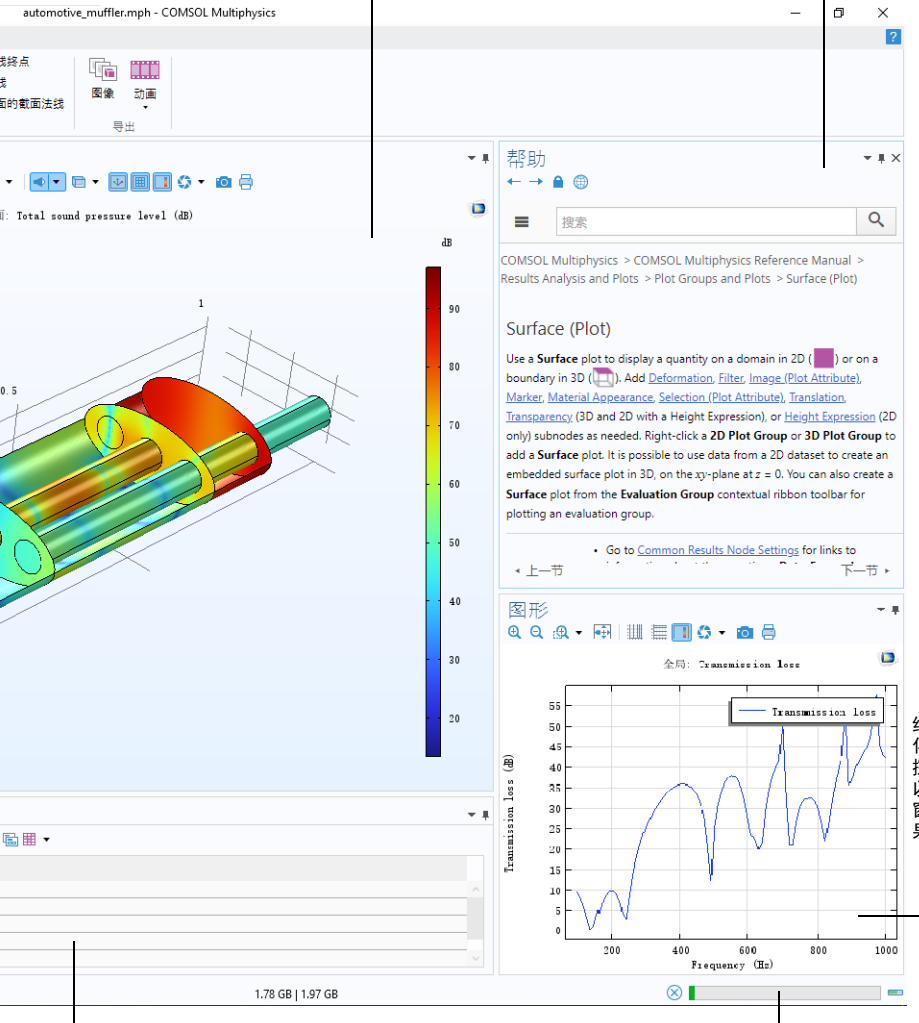
请注意，您可以添加多个**参数**节点，系统会将其命名为**参数 1**、**参数 2**，以此类推。此外，**参数**还可以组织到多个实例中，然后进行参数化扫描。有关更多信息，请参见第 159 页的 “参数化扫描”。

以下跨页图片显示含附加窗口的定制桌面示例。


快速访问工具栏
设置窗口
功能区
模型开发器窗口
模型树
文件
主屏幕
定义
几何
材料
物理场
网格
研究
结果
开发工具
三维绘图组: Sound Pressure Level (acpr)
绘制
绘制于
体
切面
线
线上箭头
图像
体箭头
等值面
等值线
网格
表面
面上箭头
流线
标注
更多绘图
颜色表达式
材料外观
变形
选择
过滤器
透明
更多属性
沿法向计算
截线方向
截线起点
截线表面法线
截线终点
截面法线起点
绘制
添加绘图
属性
选择
模型开发器
根节点: automotive_muffler.mph (root)
全局定义
参数: Parameters 1
默认模型输入: Default Model Inputs
材料: Materials
组件: Component 1 (comp 1)
定义
几何: Geometry 1
材料
压力声学, 频域: Pressure Acoustics, Freq
压力声学: Pressure Acoustics 1
硬声场边界（壁）: Sound Hard Bour
初始值: Initial Values 1
平面波辐射: Plane Wave Radiation 1
平面波辐射: Plane Wave Radiation 2
内部硬声场边界（壁）: Interior Soun
网格: Mesh 1
研究: Study 1
结果: 结果
数据集: 数据集
派生值: 派生值
表格: 表格
三维绘图组: Acoustic Pressure (acpr)
三维绘图组: Sound Pressure Level (acpr)
表面: Surface 1
三维绘图组: Acoustic Pressure, Isosurfac
一维绘图组: Transmission Loss
全局: Global 1
导出: 导出
报告: 报告
设置
表面
绘制
标签: Surface 1
数据
数据集: 来自父项
表达式
表达式:
acpr.Lp_t
单位:
dB
描述:
Total sound pressure level
标题
范围
着色和样式
着色方式: 颜色表
颜色表: Rainbow
颜色图例
颜色表转换: 无
颜色表类型: 连续
插值: 线性单元
线框
质量
继承样式
图形
freq(91)=1000 Hz
消息
进度
日志
Evaluation 3D
x y z Value
0.053858 0.012218 0.027261 67.826
0.19643 -0.029536 -0.0051784 66.742
0.43681 -0.099663 0.028369 53.365
0.34015 -0.11972 -0.0036320 50.877
0.80000 0.031566 -0.018890 80.185

图形窗口

动态帮助 - 持续更新，可以在线访问 “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。



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

带取消按钮的进度条

信息窗口

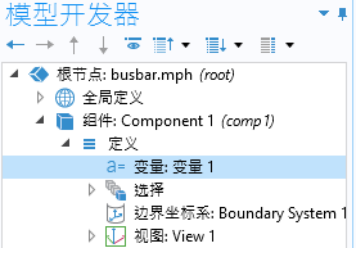
结果参数

为了实现更大的灵活性，您可以定义仅在**结果**节点中使用的参数，并且在使用这些参数时无需解析模型。

结果参数可能与其他参数和内置函数相关。

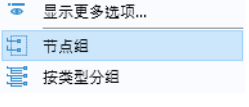
变量

变量在模型树中具有关联的**变量**节点，既可以在**全局定义**节点中进行定义，也可以在任意**组件**节点的**定义**子节点中进行定义。



当然，选择在何处定义变量取决于您希望该变量是全局可用 （即：可在整个模型树中使用），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。此外，该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，要求解的因变量 （如温度 T 或电压 V）及其空间和时间导数。

如果模型包含许多**变量**节点，您可以使用**节点组**特征将其组合在一起，如下图所示。



节点组可用于对**全局定义**、**组件**下的**定义**、**几何**、**材料**、物理场接口和结果中的节点进行分组。

App 使用的变量

您可以在 App 中使用模型参数和变量，例如，可以允许 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，此类变量也可以在模型方法中使用。

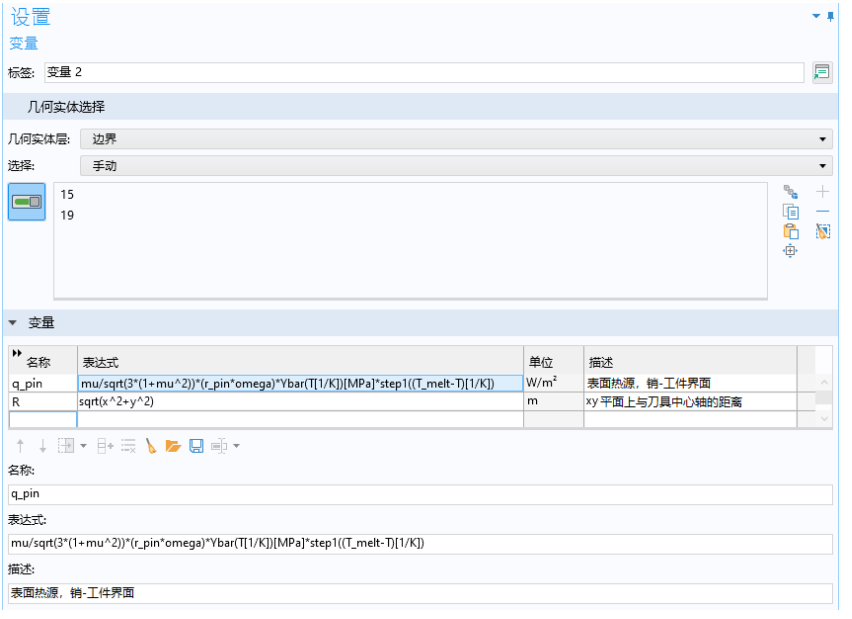
范围

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，可以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，这种变量具有全局范围，但受到其他一些限制。例如，这些变量不能用于**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，可供您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**。

下图显示两个变量 q_pin 和 R 的定义，其范围仅限于编号 15 和 19 标识的两个边界。



这样一组编号称为**选择**，您可以对其命名，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”来实现，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，则可以使用 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”可以在表单对象和方法中全局使用，但不能用于“模型开发器”。

内置常数、变量和函数

COMSOL Multiphysics 包含许多内置的常数、变量和函数，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：

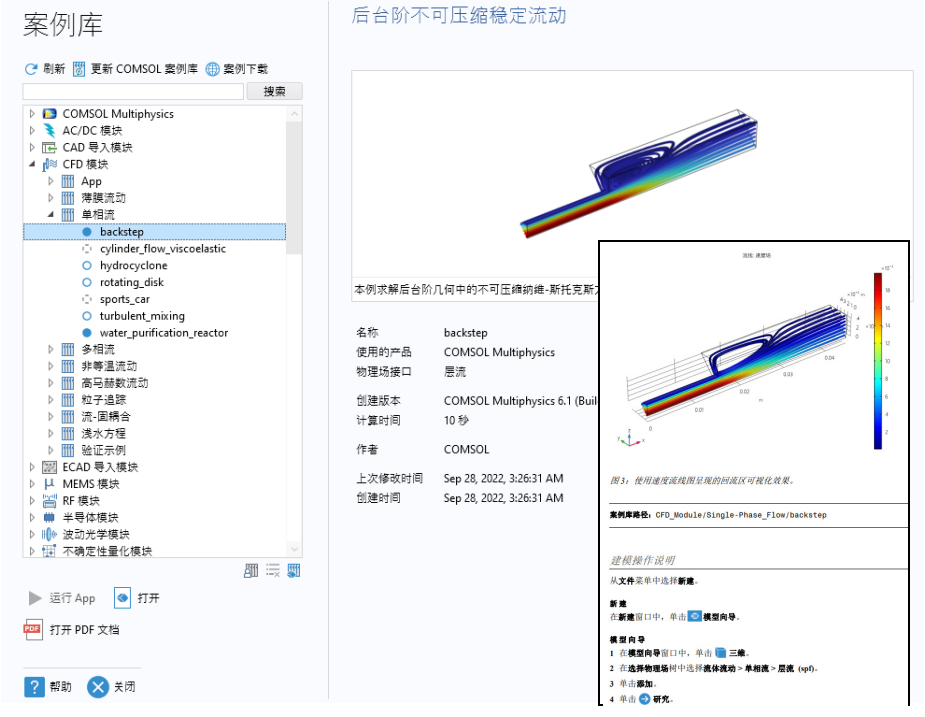
- 数学常数 （如 `pi` (3.14...)）或虚部单位 `i` 或 `j`
- 物理常数，如 `g_const`（重力加速度）、`c_const`（光速）或 `R_const`（通用气体常数）
- 时间变量， `t`
- 因变量 （解）的一阶和二阶导数，其名称派生自空间坐标名称和因变量名称 （用户定义的变量）
- 数学函数，如 `cos`、 `sin`、 `exp`、 `log`、 `log10` 和 `sqrt`

有关更多信息，请参见第 225 页的 “附录 C - 语言元素和保留名称”。

案例库

“案例库”是 MPH 文件 （包含教学模型）和可运行 App 及其附属文档的集合，其中的教学模型演示如何使用 “模型开发器” ，附带的文档包含相关理论背景和分步操作说明。可运行的 App 包含如何使用该 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和 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。

您可以从**主屏幕**工具栏的**窗口**菜单中选择**案例库**，也可以从**文件**菜单中选择来打开**案例库**窗口，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，您也可以从**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 文件可具有三种格式 - “已求解”的 MPH 文件、“未求解”的精简 MPH 文件或 “预览” MPH 文件：

- “已求解”的 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。
- “未求解”的精简 MPH 文件包含所有模型设置，但不包含构建的网格和解数据，从而可以节省安装空间。某些 MPH 文件由于其他一些原因而不包含解，因此计算时间非常短，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，并进行网格划分和重新求解。此外，还可以在更新 “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。如果您将光标悬停在**案例库**窗口的压缩文件上，系统会显示一条消息，提示**未存储解**。您可以通过“案例库更新”下载已求解的版本（除了少数情况下，文件是与其他常规模型相关的模板）。

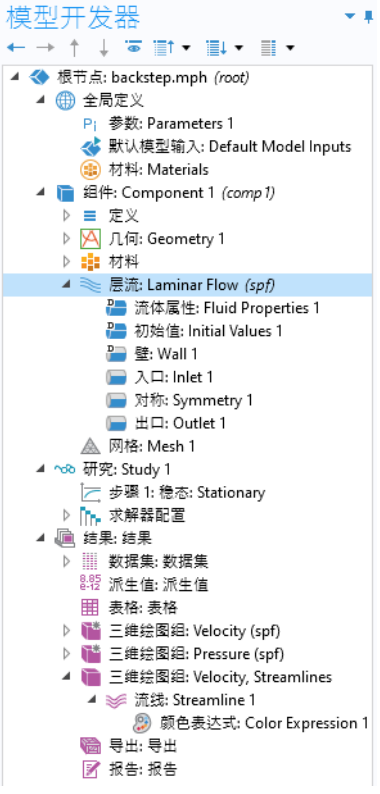
- “预览”MPH 文件只包含一个模型描述和缩略图。在**案例库**窗口中，此类文件带有 图标。该文件是 App 或模型文件的预览文件，包含模型描述和有关所用产品、物理场接口以及计算时间的信息。您可以下载已求解和未求解版本的文件。如果您已指定使用在线帮助，则可以获取模型文档（请参阅 *Reference Manual* 获取相关操作的详细信息）。

COMSOL 会定期更新“案例库”。您可以单击**案例库**窗口顶部的**更新 COMSOL 案例库** 来检查所有可用的更新，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，可以连接到 COMSOL 网站，并在此访问新的 App 和最新的更新。

如果计算机已连接互联网，您可以单击**案例下载**按钮，从 COMSOL 网站访问更多丰富的示例。

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**

您可以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 + 上箭头或 Ctrl + 下箭头

在其他分支中，节点顺序对操作序列的影响不大，但您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，其中包含您执行的所有修正操作，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更改信息，只保留最终建模步骤的干净副本。在 “App 开发器”的 “方法编辑器”中，您可以使用**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验。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，请访问“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特性而发生永久变形。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，然后再学习第 72 页的 “示例 2：母线板 - 多物理场模型”教程。

模型向导

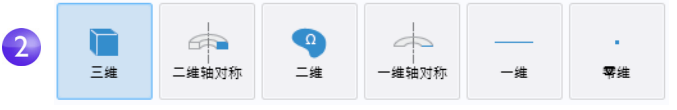
1 您可以通过双击桌面上的 COMSOL Multiphysics 图标来启动软件，随后会显示**新建**窗口，其中包含两个用于创建新模型的选项：**模型向导**和**空模型**。

如果选择**空模型**，则可以在模型树中右键单击根节点以手动添加**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，您可以从**文件**菜单中选择**新建**来启动 “模型向导”。选择**模型向导**。

它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。

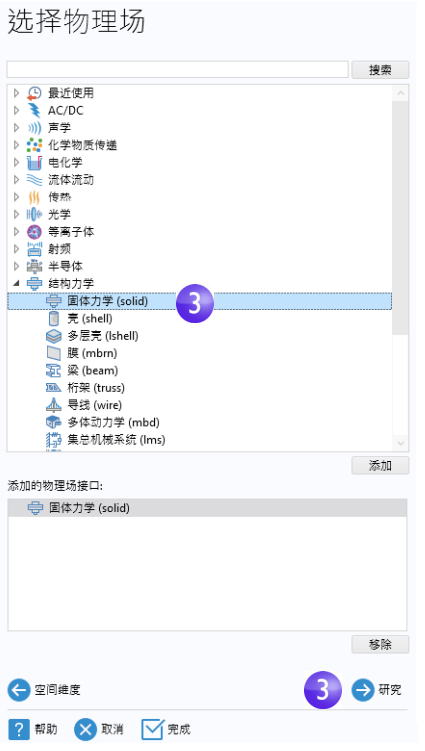
2 在**选择空间维度**窗口中选择 “三维”。



3 在**选择物理场**中选择**结构力学** > **固体力学 (solid)**。然后单击**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**一般研究**下的**稳态**。完成操作后，单击**完成**。

一般研究和其他预设研究包含适合所选物理场的求解器和方程设置，本例中为**固体力学**。本案例使用**稳态**研究类型 - 无时变载荷或材料属性。

从**更多研究**分支 中所做的任何选择均需手动设置。

几何

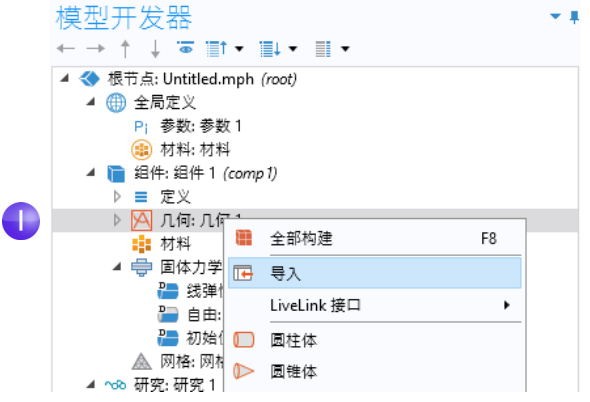
本教程使用之前创建的以 COMSOL 原生 CAD 格式 `.mphbin` 存储的几何。如需了解如何构建您自己的几何，请参见第 201 页的 “附录 A - 构建几何”。

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不同。在 Windows® 上，文件路径类似于：

`C:\Program Files\COMSOL\COMSOL61\Multiphysics\applications`。

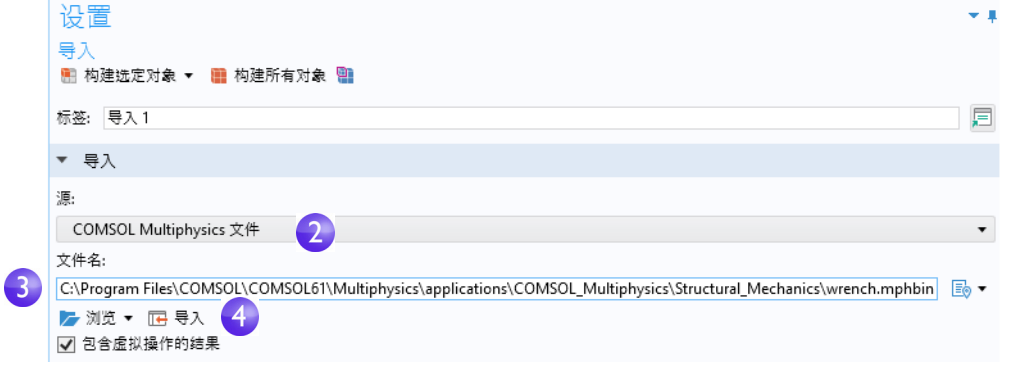
接下来，按照以下步骤导入现成的几何文件。

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1** 节点下，右键单击**几何 1** 并选择**导入**。



或者，您也可以从功能区的**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** （如果尚未选择）。



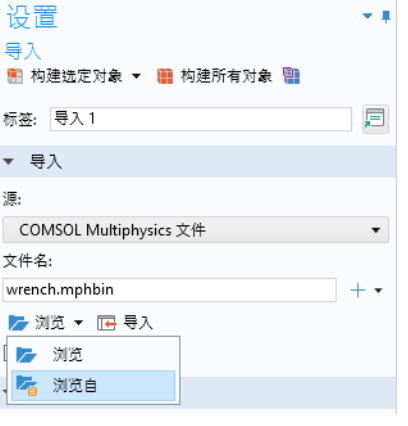
3 单击**浏览**，并在 COMSOL 安装文件夹的案例库文件夹中找到 `wrench.mphbin` 文件。在 Windows® 系统中，默认位置为：

```
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL61\Multiphysics\applications\
COMSOL_Multiphysics\Structural_Mechanics\wrench.mphbin
```

双击进行添加，或单击**打开**。

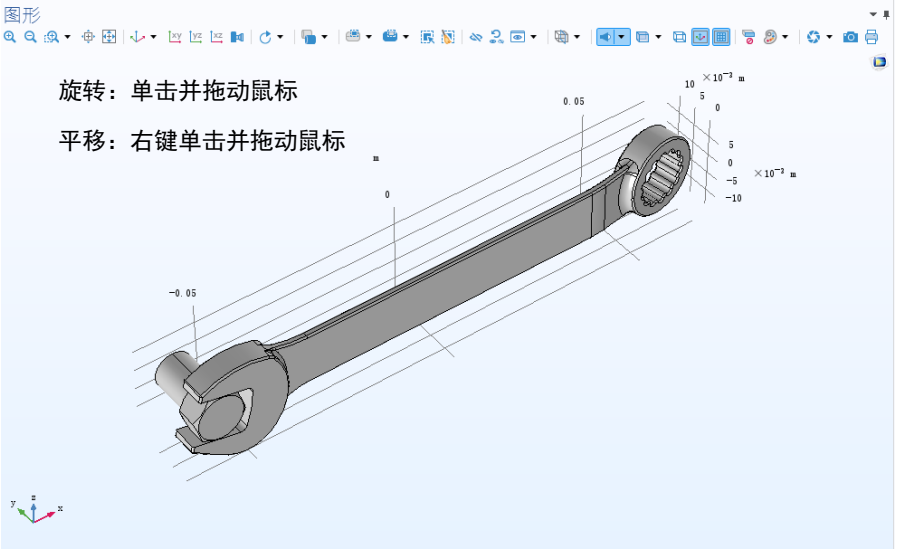
4 单击**导入**。此时，**图形**窗口中会显示导入的几何。

在**导入**栏中，有两个选项可用于定位要导入的文件：**浏览**和**浏览自**。您可以使用**浏览**选项通过**打开**对话框从文件系统导入文件，或者使用**浏览自**选项在文件系统或“模型管理器”数据库中进行浏览。



5 单击**图形**窗口中的扳手几何，并试着四处移动它。当您指向或单击该几何时，其颜色会发生改变。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** 和**透明** 按钮，观察几何的变化：

- 要旋转几何，您可以在**图形**窗口中的任意位置单击并拖动鼠标。
- 要移动几何，右键单击并拖动鼠标。
- 要缩放几何，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，另请参见第 218 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。

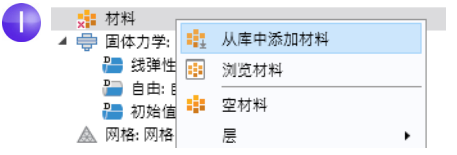
材料

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。

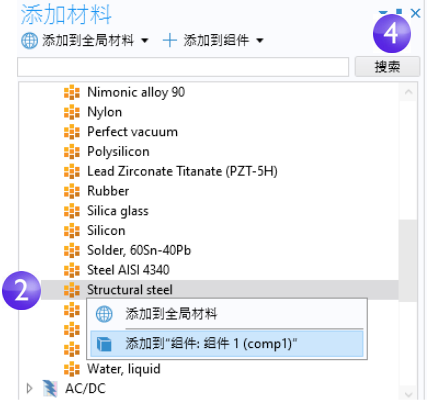
您可以通过以下两种方式来打开**添加材料**窗口：

- 在**模型开发器**窗口中，右键单击**组件 1 > 材料**，并选择**从库中添加材料**。
- 从功能区中选择**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，以查看可用的属性。在仿真过程中，带有复选标记的属性是物理场使用的属性。



4 关闭**添加材料**窗口。

属性	变量	值	单位	属性組
密度	rho	7850[kg/m^3]	kg/m³	基本
杨氏模量	E	E(T)	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	nu(T)	1	杨氏模量和泊松比
各向同性结构化损耗因子	eta_s	0.02	1	基本
相对磁导率	mur_iso ;...	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_is...	4.032e6[S/m]	S/m	基本
相对介电常数	epsilonr_...	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/m²	Murnaghan

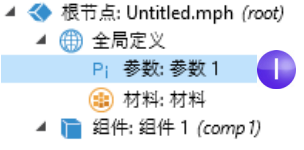
如需了解有关材料使用的更多信息，另请参见母线板教程章节：第 84 页的 “材料” 和第 133 页的 “定制材料”。

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

1 在**模型开发器**窗口的**全局定义** 节点下，选择**参数 1** 。



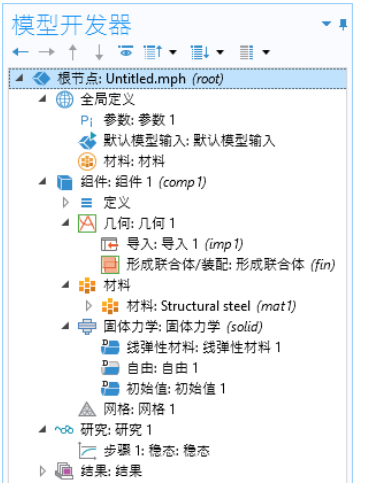
2 转到**参数 1** 的**设置**窗口。在**参数**表中输入以下设置：

- 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。

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进行排序。

有关参数使用的更多信息，请参见第 77 页的 “全局定义” 和第 128 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 左上角用 **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）。

您不能移除默认的物理场节点，但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和其他节点的设置，或者与它们共存。有关更多信息，请参见第 144 页的“替代与共存：独占和共存节点”。

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**另存为**。浏览到您拥有写权限的文件夹，将文件另存为 `wrench.mph`。

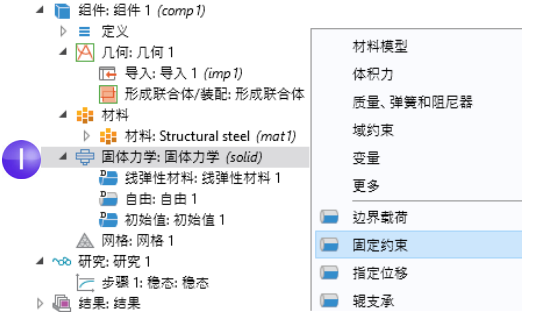
物理场和边界条件

定义几何与材料后，即可开始设置边界条件。

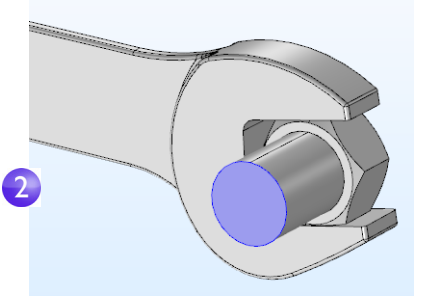
1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**固定约束**。

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。

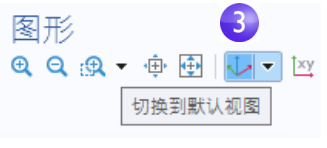
此外，您也可以使用功能区从**物理场**选项卡中选择**边界 > 固定约束**。



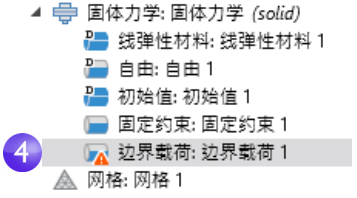
2 在**图形**窗口中，通过单击窗口中的任意位置并将扳手拖动到如图所示的位置，可以旋转几何。单击部分建模螺栓暴露的前表面，该边界变成蓝色，表明已被选中。**选择**列表中的**边界编号**应为 **35**。



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。

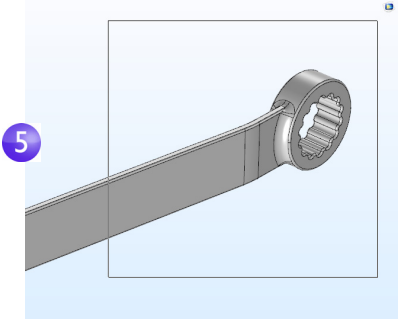


4 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**边界载荷**。**边界载荷**节点 将添加到**模型开发器**序列中。

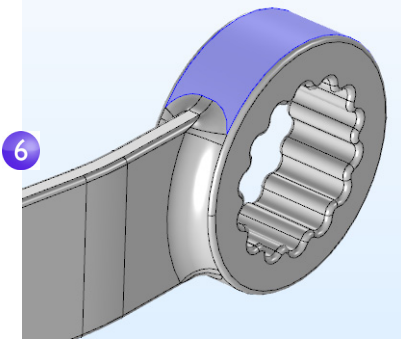


边界载荷节点上显示的“警告”属性表明，其边界选择为空。下一步是选择边界。

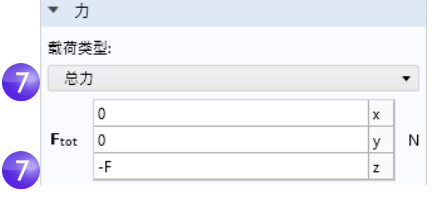
5 在**图形**窗口中，单击工具栏中的**缩放框**按钮，然后拖动鼠标选择右图所示的方形区域。释放鼠标按键，将选定区域放大。



6 单击边界以选择套筒顶面（边界 **111**），将其突出显示为蓝色，并添加到**选择**列表中。



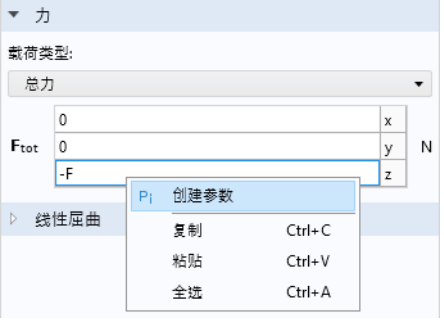
7 在**边界载荷设置**窗口的**力**栏中，选择**总力**作为**载荷类型**，然后在 *z* 分量的文本框中输入 -F。负号表示负 *z* 方向（向下）。通过这些设置， 150 N 的载荷将均匀分布在选定的表面上。



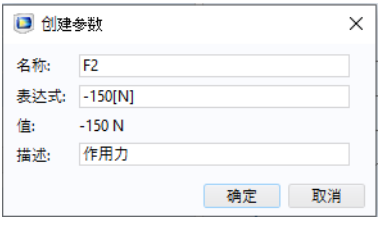
请注意，为简化建模过程，您可以使用材料界面边界条件来近似描述螺栓与扳手之间的机械接触。这种内部边界条件是自动定义的，可以确保跨材料界面的正应力和位移的连续性。借助“结构力学模块”，您可以对机械接触等进行更详细的分析。

直接从文本框中添加参数

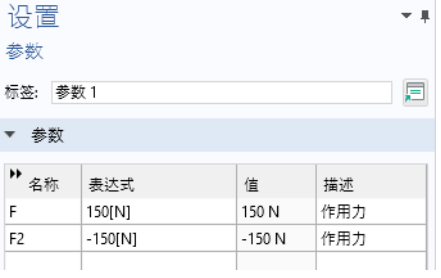
作为上述方法的替代方法，您可以直接从文本框中添加或编辑参数。例如，在扳手模型案例中，首先在**总力** *z* 分量的文本框中键入值。然后，右键单击该文本框并从下拉菜单中选择**创建参数**，以打开**创建参数**对话框，如下面第二个图所示。



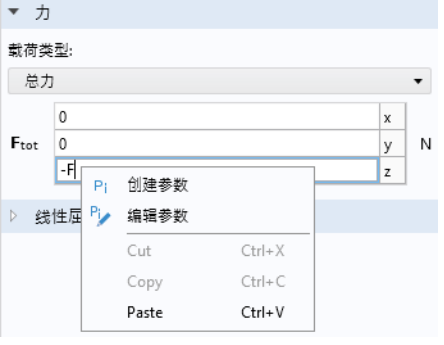
您可以在该对话框中输入参数**名称**和**描述**。



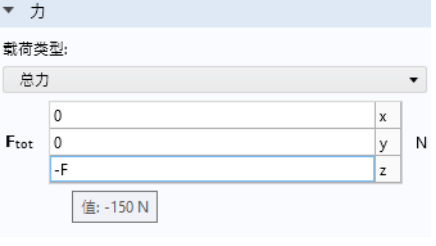
此时，该参数会添加到**参数**列表中，如下图所示。



要编辑参数，可以在编辑框中选择该参数，然后右键单击并选择**编辑参数**。



请注意，当您将光标悬停在编辑框和表格单元格上时，会出现工具提示，显示该参数或表达式的值。该方法仅适用于值为常数的情况。

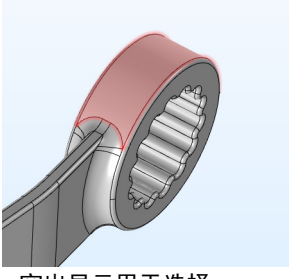


选择边界和其他几何实体

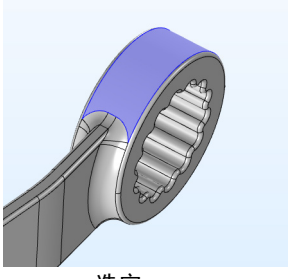
当边界处于未选中状态时，通常显示为灰色，但您在使用**材料**中的材料**外观**设置时例外，请参见第 88 页。要选择边界，请先将光标悬停在该边界上，它会以红色突出显示（假定该边界之前未选中）。此时，单击以使用鼠标左键选择该边

界，它现在变成蓝色，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，该边界就会变为绿色。如果单击以绿色突出显示的边界，可使其变为取消选中状态，并再次显示为灰色。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。

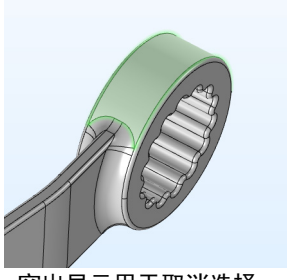
下图显示边界的不同选择状态。



突出显示用于选择



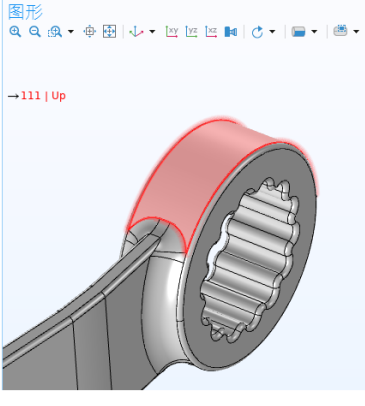
选定



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表面，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，使用键盘上的 + 和 - 键，使用键盘上的向上和向下箭头键，或在触摸板上使用两指拖动。

将光标悬停在边界上时，**图形**窗口的左上角会显示边界编号和面法向的信息，如下图所示。



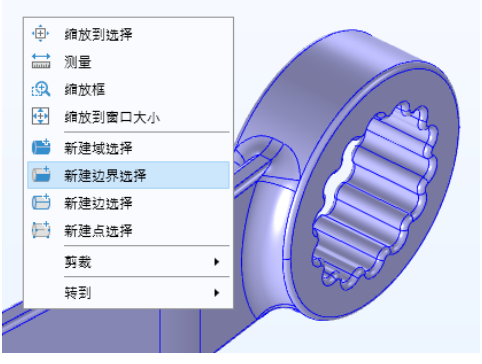
同样，在选择域、边和顶点时，会显示相应的几何实体编号。

对于每个边界表面，法矢都具有“正”、“负”方向，分别称为上、下方向。将光标悬停在表面上时，信息中会显示当前指向您的法向。例如，在定义更高级的边界条件（尤其在材料界面上）时，该信息非常有用。

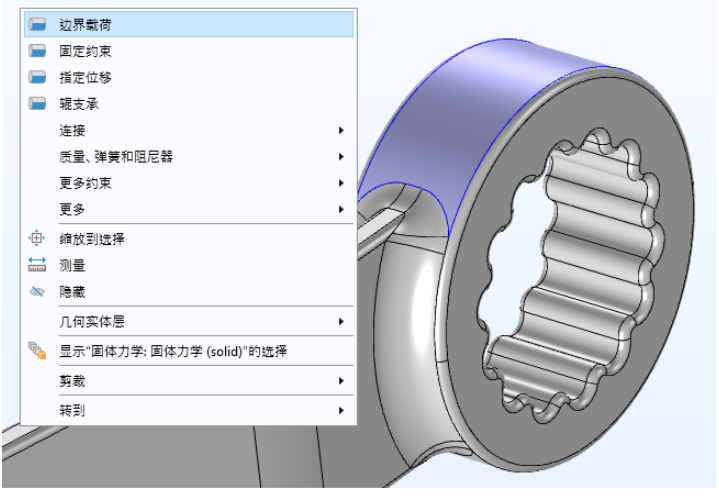
使用“图形”窗口上下文菜单进行选择

软件提供了一种替代的选择方法，您可以右键单击**图形**窗口并选择以下选项之一：域、边界、边或点选择。

例如，如果要指派**边界载荷**边界条件，首先右键单击并选择**新建边界选择**，如下图所示。



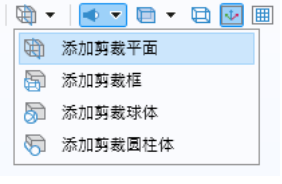
单击以选择要应用边界条件的边界。（本例中为套筒顶面，即边界 **111**。）然后，再次右键单击并选择**边界载荷**，如下图所示。



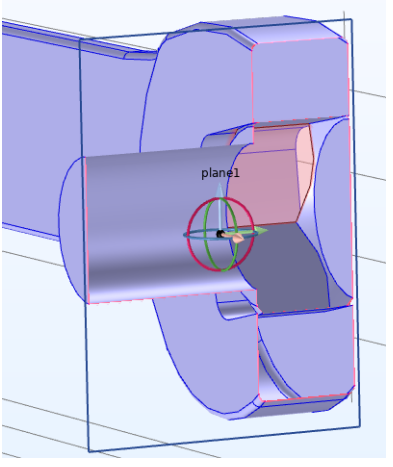
除此之外，您也可以使用此方法在已创建的边界条件选择中添加附加边界。比如，在上面的示例中，您可以在选中**固定约束**节点的同时，选择菜单选项**添加到“固定约束 1”的 “边界选择”**（尽管该选项在本例中不适用）。

使用剪裁平面进行选择

在复杂的 CAD 模型中选择几何实体时，您可以使用剪裁平面、剪裁框、剪裁球体或剪裁圆柱体选项，通过单击图形工具栏中的**剪裁**工具栏按钮进行选择。



例如，通过选择**剪裁平面**，可以快速隐藏该平面一侧的所有模型部分。下图显示用于选择扳手模型的一个内部边界的剪裁平面。

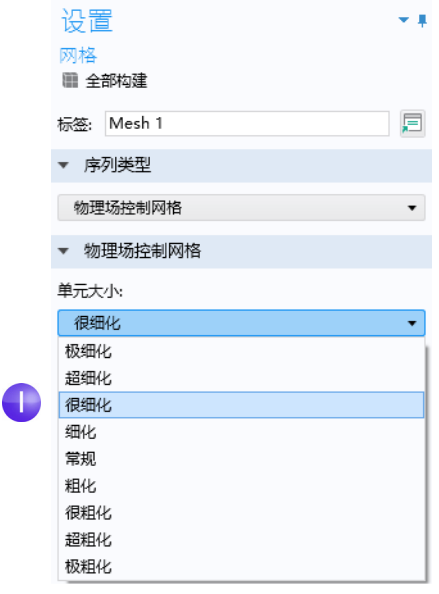


网格

网格设置可以确定用于离散模型的有限元网格的分辨率。有限元法可以将模型分割成几何形状简单的小单元，本例中为四面体。在每个四面体中，通过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。然后，对位移场进行微分来计算应力。

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，从而更好地解析应力场的变化，并得到更准确的结果。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。

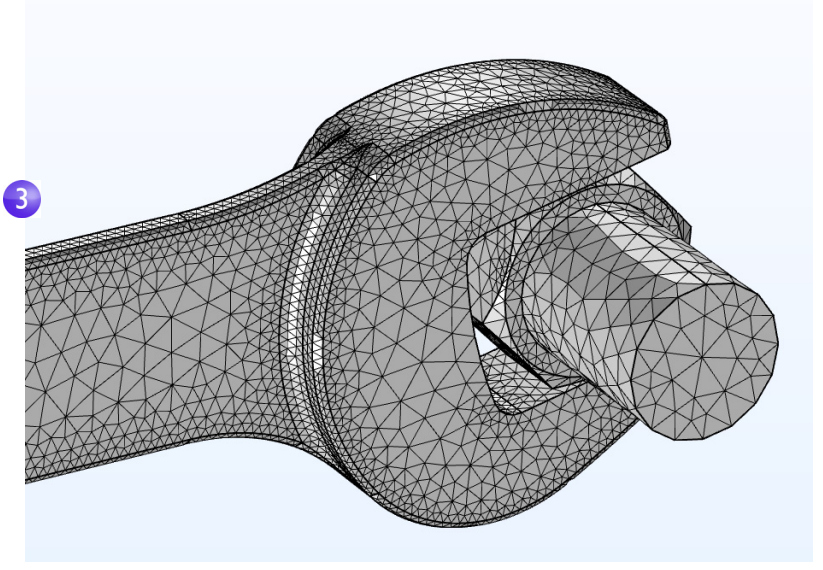
1 在**模型开发器**的**组件 1** 节点下，单击**网格 1** 。在**网格设置**窗口的**网格设置**栏下，从**单元大小**列表中选择**很细化**。



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**很细化**）。

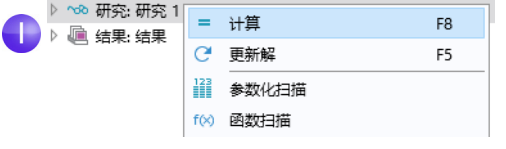
3 几秒钟后，网格将显示在**图形**窗口中。您可以旋转扳手以查看单元大小分布（根据您运行的版本，结果可能略有不同）。



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、变形和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）。



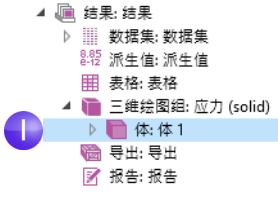
经过几秒钟的计算后，默认绘图将显示在**图形**窗口中。在计算过程中，**进度**窗口会显示求解器的进度信息。计算完成后，您可以在**消息**和**日志**窗口中找到计算相关的其他有用

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；您也可以从功能区**主屏幕**选项卡的**窗口**下拉列表中打开**消息**窗口。

结果

图形窗口的默认**体**图中显示了 von Mises 应力，其中使用**变形**子节点将位移可视化。请按照以下所示的步骤，将默认单位 (N/m^2) 改为更合适的 MPa。

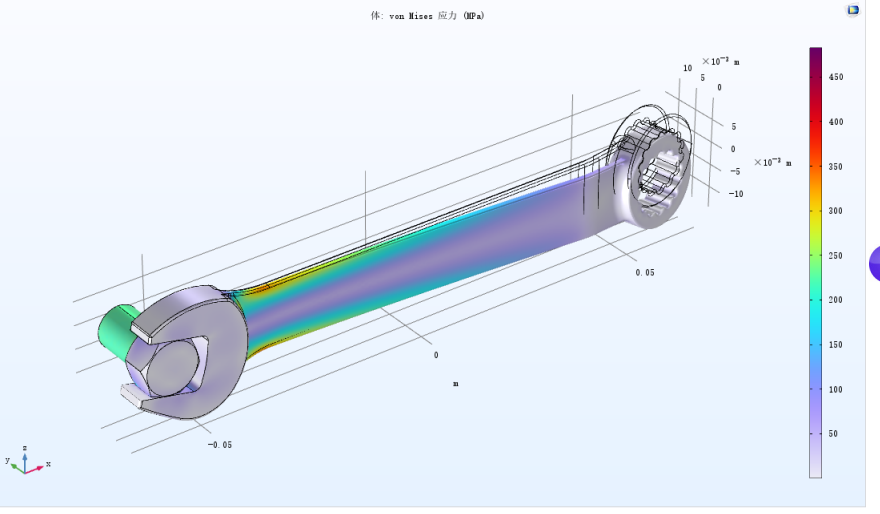
1 在**模型开发器**中，展开**结果 > 应力 (solid)** 节点，然后单击**体 1**。



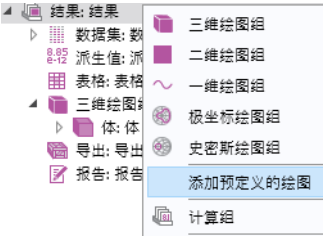
2 在**设置**窗口的**表达式**栏下，从**单位**列表中选择 **MPa**（或在编辑框中键入 MPa）。

3 在**体**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 。

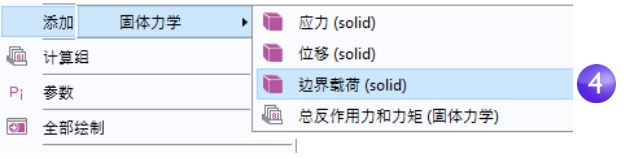
该绘图显示在施加垂直载荷时，螺栓与扳手中的 von Mises 应力分布。



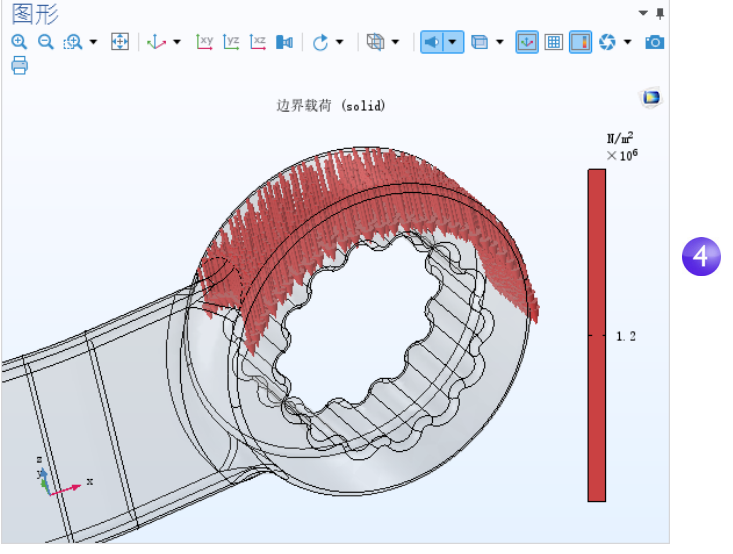
您可以添加附加的预定义绘图，方法是：从由**结果**节点下的**添加预定义的绘图**定义的列表中进行选择，或者从功能区**主屏幕**选项卡单击相应的按钮。



4 例如，您可以生成外加载荷分布的可视化效果。右键单击**结果**并选择**添加预定义的绘图 > 研究 1/ 解 1 > 固体力学 > 边界载荷**。

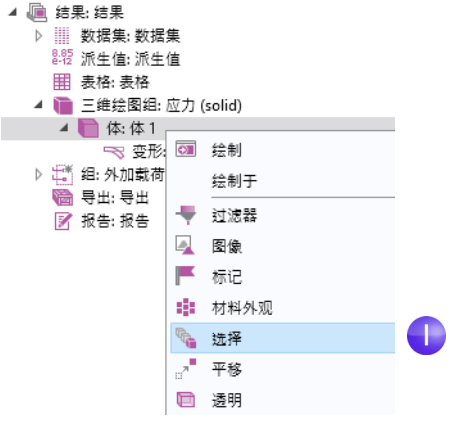


由此产生的绘图用箭头显示边界载荷。

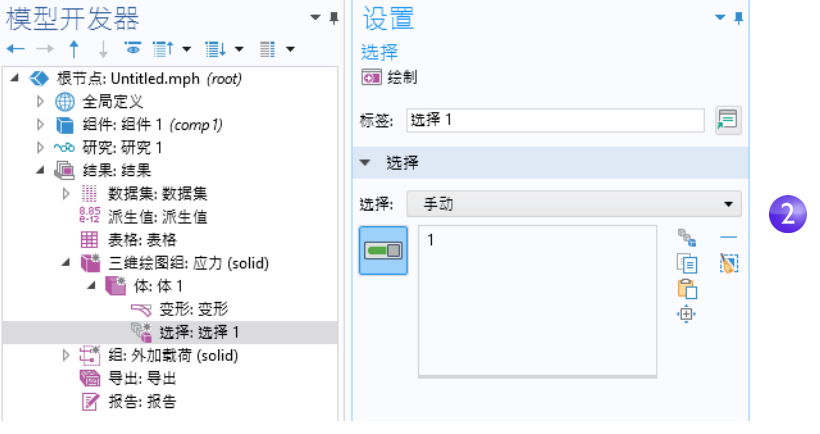


由于我们本次仿真的目的不是分析螺栓的应力，因此可以通过添加**选择**节点，来选择性地只将扳手的应力进行可视化。

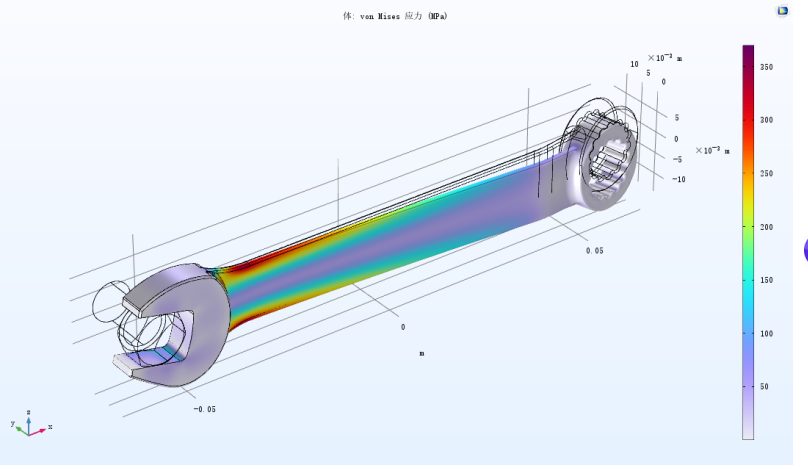
1 右键单击**应力** > **体**节点并选取**选择** 。



2 在 **图形**窗口中，单击扳手 （域 1）。

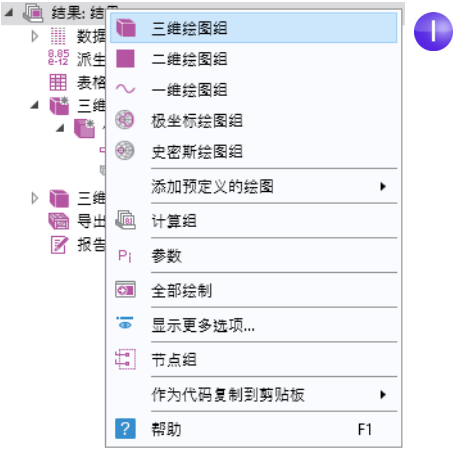


3 单击**绘制**以查看可视化效果。

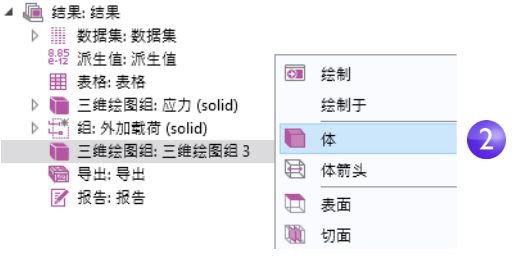


对于扳手等工具使用的典型钢材，屈服应力约为 600 MPa，这意味着在 150 N 载荷（大约相当于 34 磅的力）作用下，扳手可能发生塑性变形。此外，您可能还需要考虑例如安全系数为 3 的一定安全裕度。要快速评估扳手的哪些部分存在塑性变形的风险，可以绘制诸如 `solid.mises>200[MPa]` 的不等式表达式。

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 3** 节点 并选择**体** 。



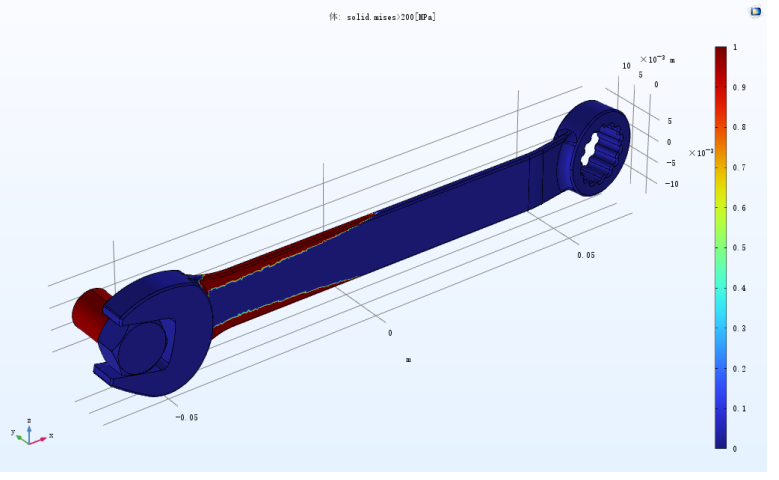
3 在**体**的**设置**窗口中，单击**替换表达式**按钮 并选择**模型 > 组件 1 > 固体力学 > 应力 > solid.mises-von Mises 应力 - N/m²**（双击将其选中）。如果预先知道变量名称，您也可以在**表达式**框中直接输入 `solid.mises`。现在将该表达式编辑为：`solid.mises>200[MPa]`。

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

4 单击**绘制**按钮 。

5 在**模型开发器**窗口中单击**三维绘图组 3**。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**。或者，您也可以在**设置**窗口顶部编辑标签。

从生成的绘图中可以看出，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，例如增加它的宽度。



5

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，您可以尝试从反方向施加相同的力，并将最大 von Mises 应力可视化，看看是否存在差异。

收敛性分析

COMSOL Multiphysics 等仿真软件的结果可以通过多种方式大幅缩短设计时间，比如减少实验或产品测试的次数。然而，仿真软件并不能代替真实世界的测试。当存在物理或环境损害的风险时，这一点尤其重要。执行收敛性分析便是一种降低 （但不是消除）根据仿真结果得出错误结论的风险的方法。

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，使用很细化的网格，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。

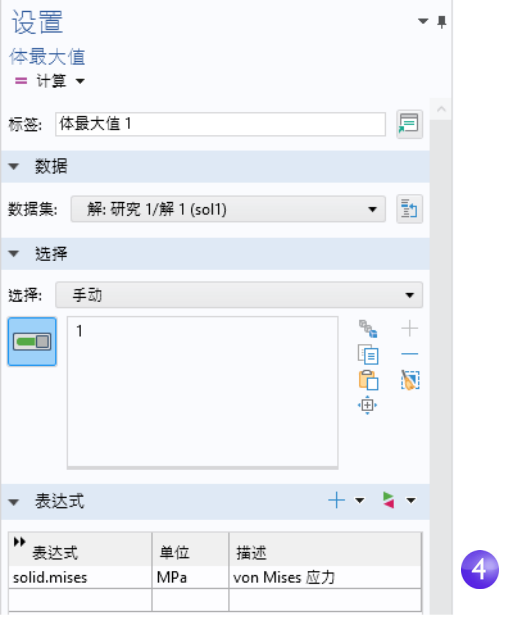
计算最大 VON MISES 应力

1 为了研究扳手中的最大 von Mises 应力，您可以在模型树的**结果**栏中右键单击**派生值** 节点，并选择**最大值** > **体最大值** MAX。

2 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 （域 1）将其选中。我们只考虑扳手域中的值，而忽略螺栓中的值。

3 定位到**表达式**表的第一行，在**表达式**列中键入 `solid.mises`。如要查找 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。

4 在**表达式**表中，键入 `MPa` 作为**单位**。



5 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。该值可能因软件版本和硬件平台的不同而略有差异。

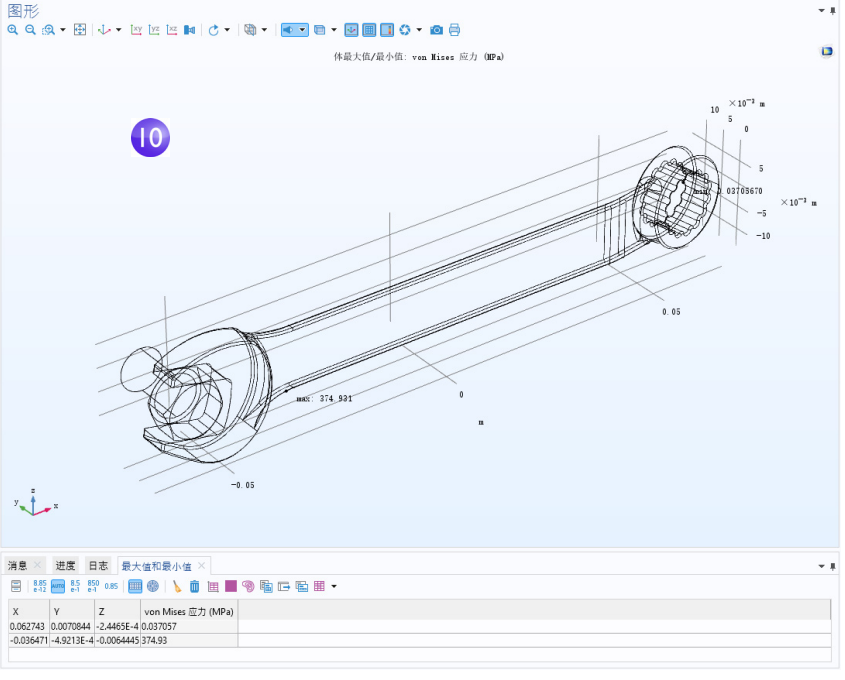
6 为了查看出现最大值的位置，您可以使用**体最大值 / 最小值**等绘图。右键单击**结果**节点 并添加**三维绘图组** 。然后，右键单击**三维绘图组 4** 节点 ，并选择**更多绘图 > 体最大值 / 最小值** 。

7 要在扳手而非螺栓中绘制值，可以右键单击**体最大值 / 最小值** 节点并选取**选择**，然后选择扳手 （域编号 1）。

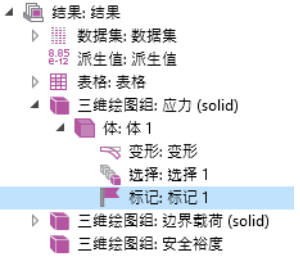
8 在**体最大值 / 最小值设置**窗口的**表达式**文本框中，键入 `solid.mises`。

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，并在其下方表格中显示相应的坐标位置 （根据您运行的版本，确切的值可能会有所不同）。



绘制最大和最小应力的另一种方法是右键单击**应力** > **体**图，然后选择**标记**。



参数化网格

现在，我们将定义一个参数化扫描，以在求解时连续细化网格大小，最终绘制最大 von Mises 应力与网格大小的关系图。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**窗口中，单击**全局定义** 下的**参数 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。此参数将在参数化扫描中用于控制单元的大小。
- 在**表达式**列或编辑框中输入 2。
- 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 h0，**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。

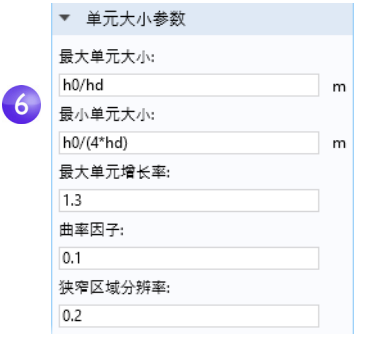
4 在**模型开发器**窗口的**组件 1** 节点下，单击**网格 1** 。在**网格**的**设置**窗口中，从**序列类型**列表中选择**用户控制网格**。

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。

定位到**单元大小参数**栏：

- 在**最大单元大小**框中输入 h0/hd。
- 在**最小单元大小**框中输入 h0/(4*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 98 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**窗口中，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 定位到**参数化扫描**的**设置**窗口，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。

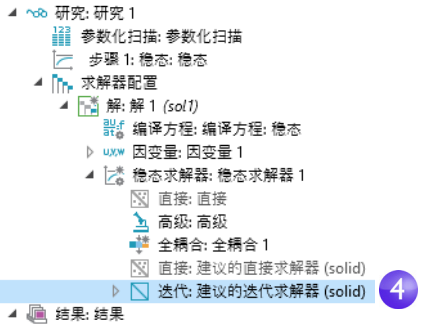
3 输入要扫描的**参数值**范围。单击**范围** 按钮，并在**范围**对话框中输入值。在**起始**框中输入 2。在**步长**框中输入 1，并在**停止**框中输入 6。单击**替换**。**参数值列表**此时将显示 range(2,1,6)。

上述设置可以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 159 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以减少内存使用量，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。

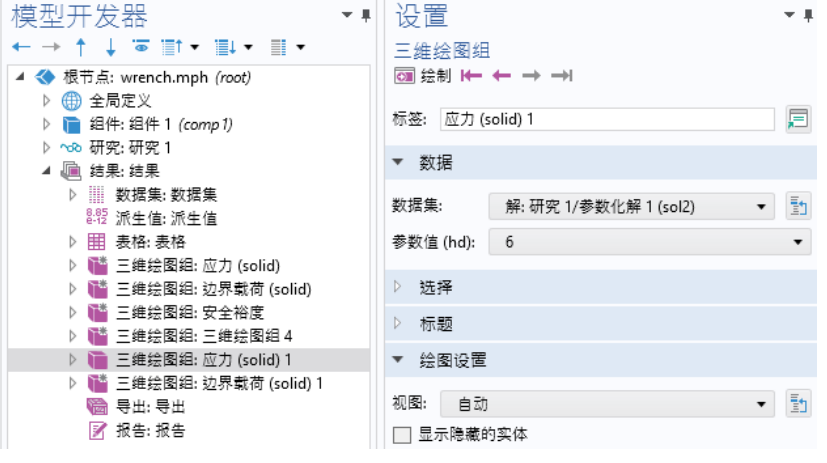


5 在**建议的迭代求解器设置**窗口的**常规**栏下，将**预处理**改为**右**。（这是一个低级别求解器选项，在本例中，可以在某些情况下抑制警告消息。不过，此设置不影响求得的解。预处理是一种数学变换，用于准备有限元方程组以使用迭代求解器。）

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。您也可以在功能区的**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

请注意，在运行参数化扫描后，会创建一组新的默认绘图节点，对应于新的**数据集研究 1/ 参数化解 1**。



最后一步，通过在表格中显示最大 von Mises 应力来分析参数化扫描结果。

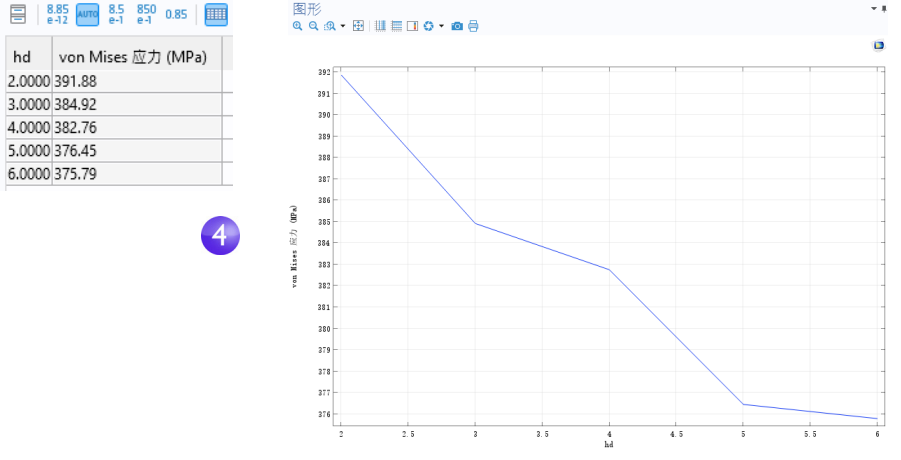
1 在**模型开发器**窗口的**结果 > 派生值**下，选择**体最大值 1** 节点 MAX。

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。计算时间可能需要 10 秒左右，具体取决于计算机的性能。

4 为了绘制**表格**中的结果，您可以单击**表格**窗口顶部的**表图** 按钮 （在达到收敛值之前，由于很粗化的网格版本之间的网格有轻微变化，前几个值会有所不同）。



绘制最大值 vs. 自由度数的关系图会更有意义，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**。

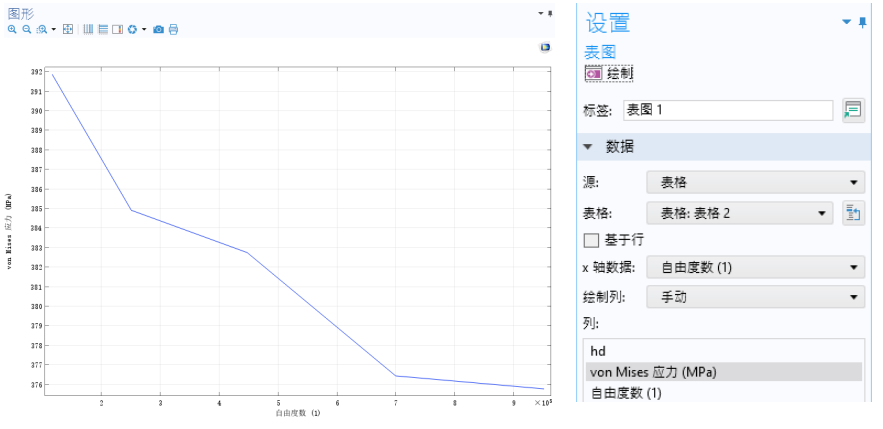
7 在**表达式**框中输入 `numberofdofs`。

> 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** 或**表格 1** 中进行计算，具体取决于您之前选择遵循的步骤。这样可以在先前计算的数据旁显示每个参数的自由度值。

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 115,000 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，当自由度数大于 700,000 时，得到的结果与 1,000,000 个自由度的精度基本相同。

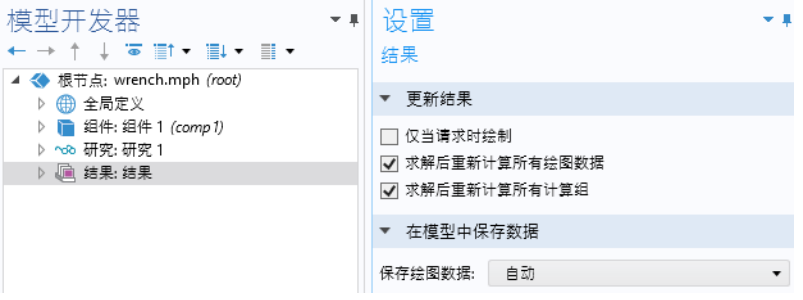
下图显示**表图**及关联的**表图设置**窗口。



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

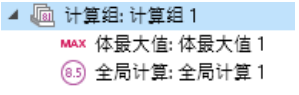
您可以使用**计算组**作为**派生值**的备选项。**计算组**可以共享**绘图组**和**派生值**的一些属性，其中带有一个集成的表格，而**派生值**会输出到您选择的表格中。

此外，**计算组**还支持在求解后自动重新进行计算。为了启用此功能，您可以在**结果**节点的**设置**窗口中选中相应的复选框，如下图所示。



在这个**设置**窗口中，您还可以请求在求解后重新生成所有绘图。

计算组的添加方式与**绘图组**相同：只需右键单击**结果**节点即可。下图显示的**计算组**与前述的**派生值**节点执行相同的任务。



下图显示相应的**计算组**表格。

hd	von Mises 应力 (MPa)	自由度数 (1)
2.0000	391.88	1.1564E5
3.0000	384.92	2.5011E5
4.0000	382.76	4.4698E5
5.0000	376.45	6.9909E5
6.0000	375.79	9.5113E5

扳手教程到此结束。

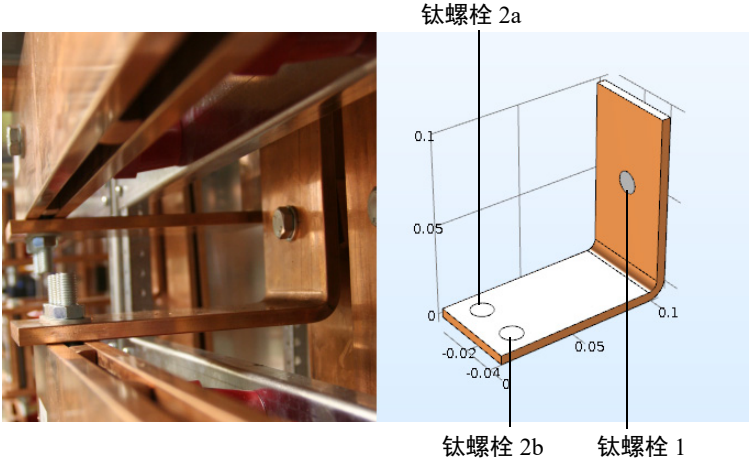
示例 2：母线板 - 多物理场模型

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。

本例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 （见下图）。当母线板中的电流从螺栓 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，但在本例中我们将假设一个强腐蚀性环境，因此选择了钛合金。

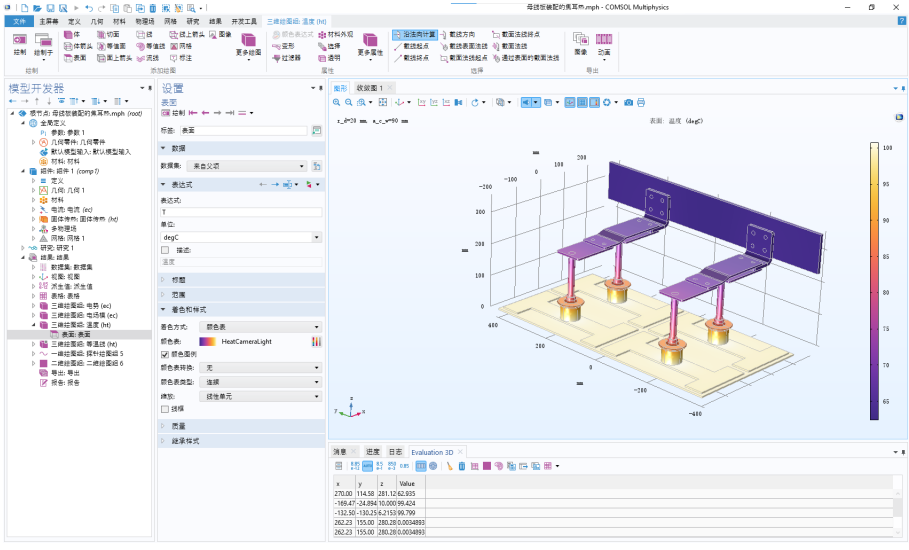
在正常工作条件下，电流主要在铜内传导。然而，本例中演示的是母线板中由螺栓引起的、并不希望产生的电流载荷。材料不同这一事实非常重要，由于钛的电导率比铜低，因此将承受较高的电流密度。



仿真的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现象后，您便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，可以通过这两个守恒定律分别得到温度场和电场。所有表面 （除螺栓接触面以外）均通过母线板周围空

气的自然对流进行冷却。您可以假设螺栓的外露部分不会影响设备的冷却或加热。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”提供更高级的边界条件用于电磁分析，例如可以给出边界上的总电流。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，可以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，主要涉及以下主题：

- 第 128 页的“参数、函数、变量和耦合”，介绍如何定义函数和非局部耦合。
- 第 133 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 134 页的“添加网格”，介绍如何添加和定义两种不同的网格，然后在**图形**窗口中进行比较。
- 第 137 页的“添加物理场”，介绍如何在母线板模型中添加“固体力学”和“层流”，从而探索各种多物理场功能。
- 第 159 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 171 页的“并行计算”，概括介绍如何基于集群进行求解。
- 第 175 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。此外，您也可以随时启动**模型向导**，方法是从**文件**菜单中选择**新建**。然后选择**模型向导**。

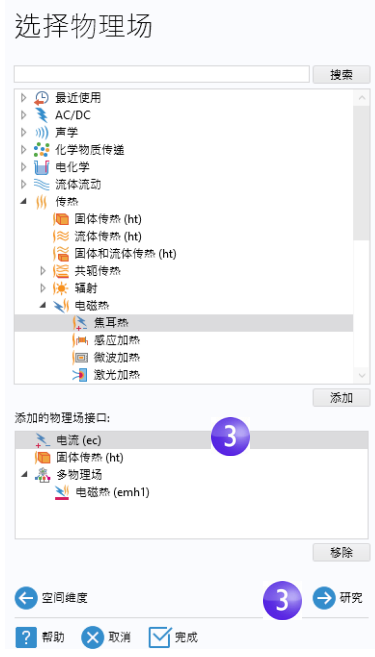
2 在**选择空间维度**窗口中，单击**三维**。

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。

此外，您也可以双击选定的物理场接口或单击**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**窗口中右键单击**组件**节点，然后选择**添加物理场** 。）

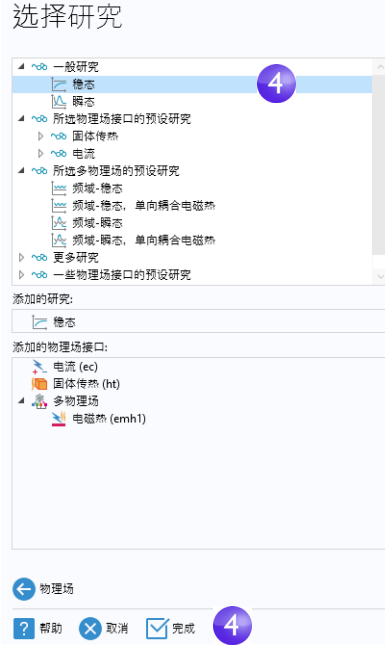
右图显示安装了所有附加模块后的物理场列表。请注意，您的物理场列表所含的项可能更少，具体取决于安装的附加模块。



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。

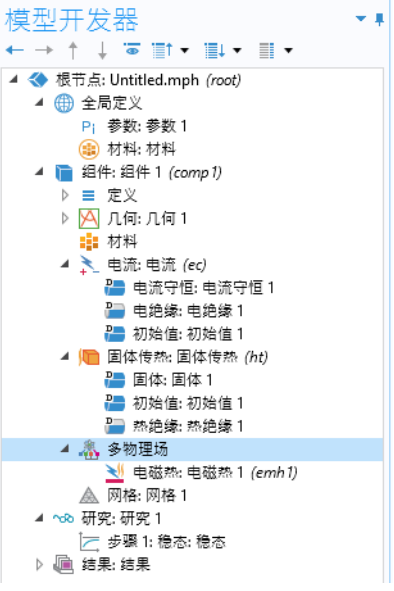
选择稳态研究意味着在母线板与周围环境达到热平衡时，对其稳态温度进行求解。



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。

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。

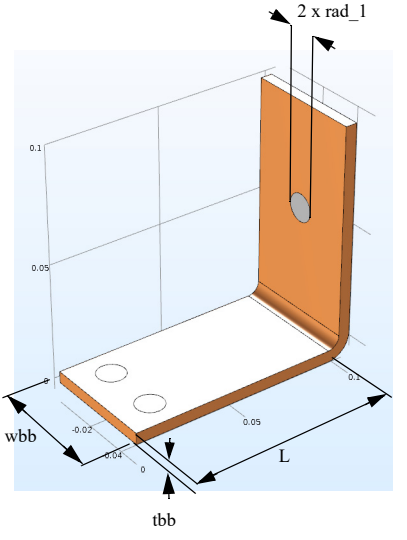
物理场接口是针对特定物理领域的用户界面，用于定义方程，其中包含有关网格生成、求解器、可视化和结果的设置。多物理场接口是物理场接口与多物理场耦合的结合体。**焦耳热**多物理场接口由两个物理场接口组成：**电流**和**固体传热**，并与**多物理场**分支中显示的**电磁热**进行多物理场耦合。这种耦合物理场的方法非常灵活，您可以使用每个相关物理场接口的所有功能进行多物理场耦合分析。



全局定义

为节省时间，建议您从文件加载几何。为此，您可以跳到第 80 页的 “几何” 部分。

或者，如果您想要自己绘制几何，也可以在**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 201 页的“附录 A - 构建几何”一节。



模型开发器窗口中的**全局定义**节点 可以存储适用于全局范围的**参数**、**变量**和**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。在本例中，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，请输入以下参数：母线板较低部分的长度 `L`、钛螺栓半径 `rad_1`、母线板厚度 `tbb` 以及设备宽度 `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` 以及整个母线板的电压值 `Vtot`。

1 在**全局定义** 节点下选择**参数** 。在**参数**表中，单击**名称**下的第一行，然后输入 `L`。

2 单击**表达式**下的第一行并输入 `L` 的值 `9[cm]`。您可以在方括号中输入单位。

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	长度
rad_1	6[mm]	0.006 m	螺栓半径
tbb	5[mm]	0.005 m	厚度
wbb	5[cm]	0.05 m	宽度
mh	3[mm]	0.003 m	最大单元大小
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m²·K)	传热系数
Vtot	20[mV]	0.02 V	外加电压

单击“快速访问工具栏”中的**保存**按钮 并将模型命名为 busbar.mph，或者使用相应的**文件**菜单选项，然后转到第 201 页的 “附录 A - 构建几何”。

自动完成和查找工具

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。

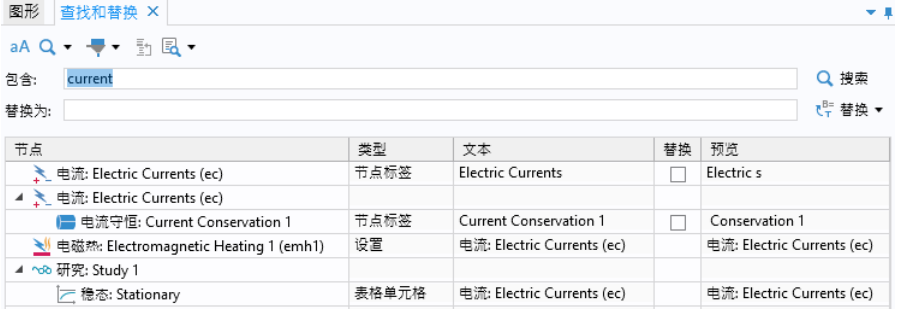
自动完成

您可以使用 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。

模型开发器窗口中的其他编辑框也具有此功能。

查找

如需在模型树中查找参数、变量以及其他字符串，您可以在**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 来 打开**查找和替换**窗口。



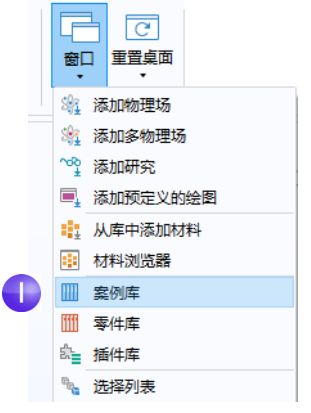
搜索结果显示在**包含**和**替换为**编辑框的下方。本例中的结果来自完成的母线板模型，通过搜索字符串**电流**得到。

您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** 。您也可以从**文件**菜单访问**案例库**。



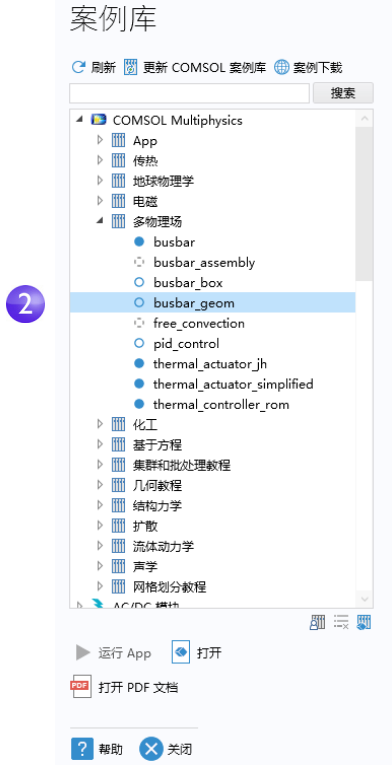
2 在**案例库**树的 **COMSOL Multiphysics > 多物理场**分支下，选择 **busbar_geom**。

您可以通过以下操作来打开该文件：

- 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

如果软件提示您保存 `Untitled.mph`，选择**否**。

该文件中的几何已参数化。在接下来的步骤中，我们会尝试对宽度参数 `wbb` 使用不同的值。

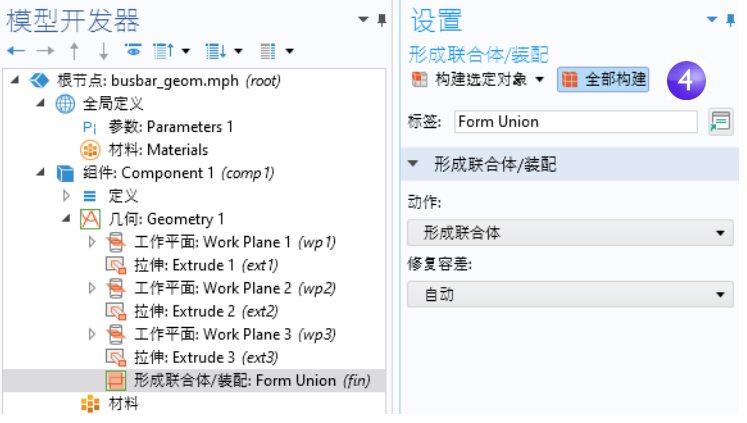


3 在**全局定义**节点 下单击**参数**节点 。

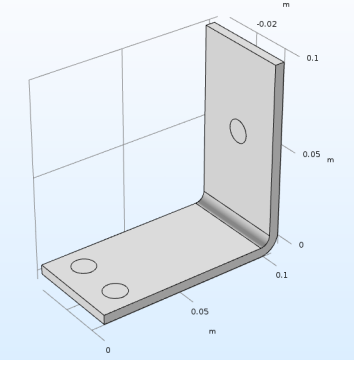
在**参数**的**设置**窗口中，单击 `wbb` 参数的**表达式**列，然后输入 `10[cm]` 以更改母线板宽度的值。

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	10[cm]	0.1 m
mh	3[mm]	0.003 m
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m²·K)
Vtot	20[mV]	0.02 V

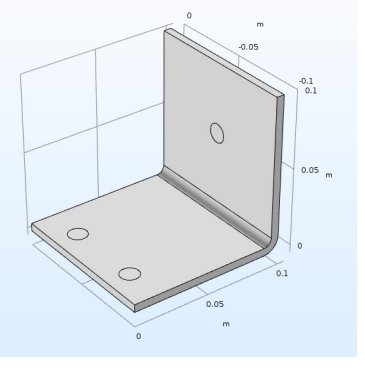
4 在**模型开发器**窗口的**组件 1 > 几何 1** 下，单击**形成联合体**节点，然后单击**设置**窗口中的**全部构建**按钮 以返回几何序列。您也可以使用功能区，在**主屏幕**选项卡的**几何**组中单击**全部构建**。



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。



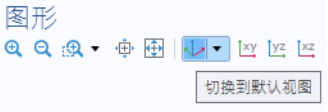
wbb = 5cm



wbb = 10cm

6 在**图形**窗口中尝试对几何执行以下操作：

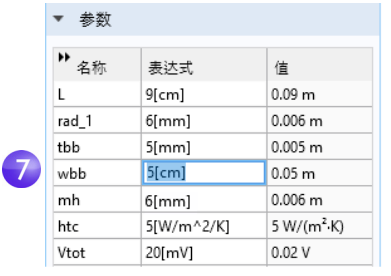
- 要旋转母线板，在**图形**窗口的任意位置单击并拖动指针。
- 要移动几何，右键单击并拖动鼠标。
- 要缩放几何，单击并按住鼠标滚轮后拖动。
- 要返回原始位置，单击工具栏中的**切换到默认三维视图**按钮 。



7 返回**参数**表，并将 wbb 的值改回 5[cm]。

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

9 在**图形**工具栏中，单击**缩放到窗口大小**按钮 。



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]	0.05 m
mh	6[mm]	0.006 m
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m²·K)
Vtot	20[mV]	0.02 V

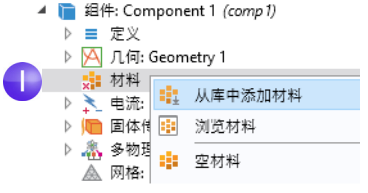
10 如果是您自己构建的几何，就可以使用 busbar.mph 文件；如果是从**案例库**窗口打开的文件，则从“文件”菜单中选择**另存为**，并将模型重命名为 busbar.mph。

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，而螺栓为钛合金材质。这两种材料都可以从**内置材料**数据库中获取。

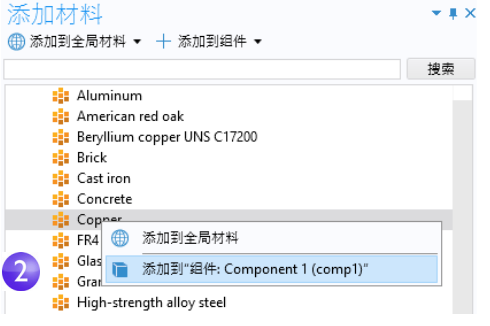
1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**组件 1** > **材料** ，然后选择**从库中添加材料** 。默认情况下，将在桌面右侧打开该窗口。您可以通过单击窗口标题并将其拖动到新位置来移动窗口。在拖动窗口时，您将看到多个停靠选项。



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的 ×，我们将在接下来的步骤中进行材料设置。

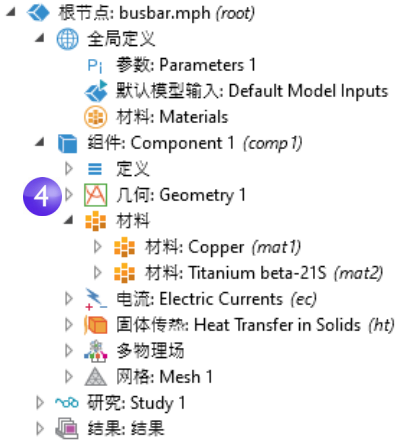
2 在**添加材料**窗口中，展开**内置材料**文件夹并定位到 **Copper**。右键单击 **Copper** 并选择**添加到组件 1**。您也可以通过双击来完成此操作。

此时 **Copper** 节点会添加到**模型开发器**窗口中。



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**窗口中，折叠**几何 1** 节点 以获取模型概览。



在这个阶段，**材料**节点可能会显示一个或多个红色的 × 符号，具体取决于活动的选择。这些符号将在接下来的几个步骤中消失。

5 在**材料**节点下，单击 **Copper** 。

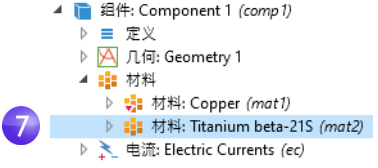
6 在**材料**的**设置**窗口中，检查**材料属性明细**栏。

	属性	变量	值	单位	属性组
☑	电导率	sigma_iso ; si...	5.998e7[S/m]	S/m	基本
☑	恒压热容	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	基本
☑	相对介电常数	epsilonr_iso ;...	1	1	基本
☑	密度	rho	8960[kg/m^3]	kg/m³	基本
☑	导热系数	k_iso ; kii = k_...	400[W/(m*K)]	W/(m·K)	基本
	相对磁导率	mur_iso ; mur...	1	1	基本
	热膨胀系数	alpha_iso ; al...	17e-6[1/K]	1/K	基本
	杨氏模量	E	110[GPa]	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任何标记。

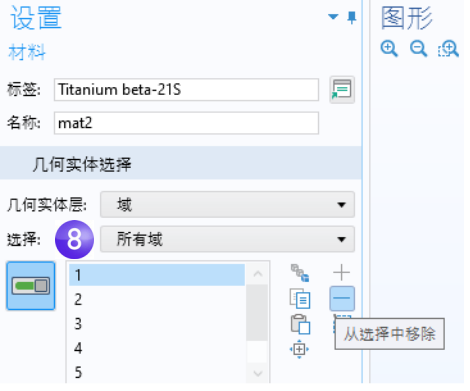
上表中的热膨胀**系数**、**杨氏模量**和**泊松比**属性暂未使用，但稍后在模型中添加热致应力和应变时需要它们。

由于我们首先添加了铜材料，默认情况下，软件会为所有零件指派铜材料。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**窗口中，单击 **Titanium beta-21S** 。

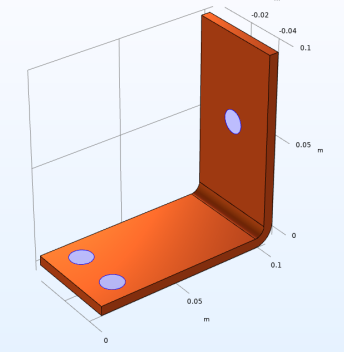
8 从**选择**列表中选择**所有域**，然后单击列表中的域 1。现在，从选择列表中移除域 1。

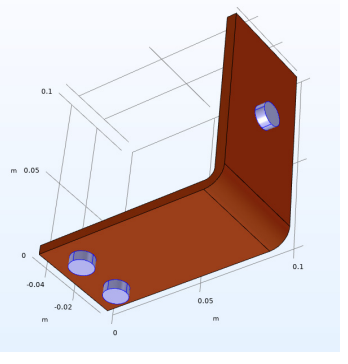


要从选择列表中移除域（或任意几何实体，如边界、边或点），可以使用以下两种方法之一：

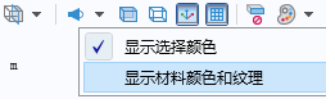
- 在**材料设置**窗口的选择列表中，单击域 1。然后单击**从选择中移除**按钮 —，或按键盘上的 Delete 键。
- 此外，您也可以在**图形**窗口中单击域 1，将其从选择列表中移除。

8 域 2、3、4、5、6 和 7 以蓝色突出显示。

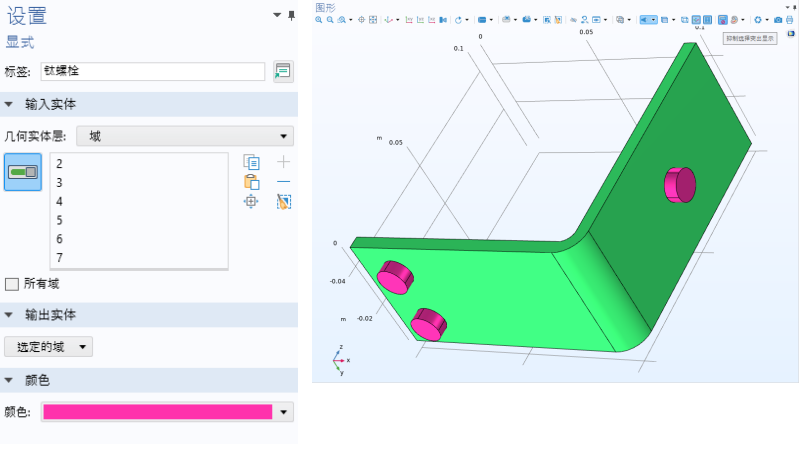




您可以使用**图形**窗口中的**颜色**工具栏按钮来启用和禁用材料颜色和纹理。通过选择**显示材料颜色和纹理**，您可以使用真实颜色渲染铜组件。这一功能也可以对其他材料实现真实渲染。此外，您也可以通过选择**显示选择颜色**来启用选择着色功能。



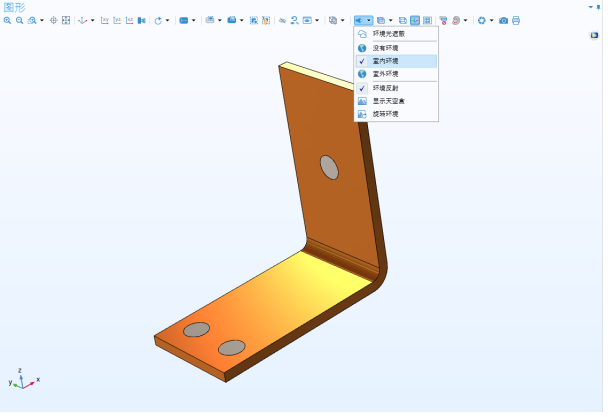
下图显示一个选择对应的**设置**和**图形**窗口，其中使用了默认设置以外的颜色（粉红色）。另一个选择（未显示）采用了其他颜色（绿色）。



请注意，您需要单击**图形**工具栏中的**抑制选择突出显示**按钮，才能在创建选择时查看颜色。有关**选择**的更多信息，请参见第 140 页。

为了进一步提高材料渲染的真实性，您可以从**图形**工具栏的**场景光**菜单按钮启用**环境反射**，可以在此菜单中选择**室内环境**或**室外环境**。

对应的图像（称为天空盒图像）将反映在材料中，从而增加真实感。当材料为金属时，这一点尤其明显，如下图所示。



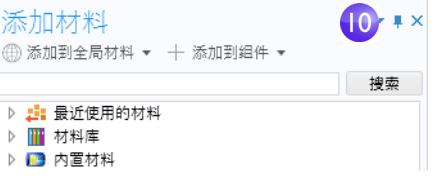
通过选择**显示天空盒**选项，您可以显示用于环境反射的相应天空盒图像。

为了得到最佳结果，您需要一个支持 **OpenGL** 的显卡。另请参见第 14 页的 “图形和绘图窗口”。

9 在**材料**的**设置**窗口中，请确保检查钛材料的**材料属性明细**栏。物理场使用的所有属性都应带有复选标记 ☑。

属性	变量	值	单位
电导率	sigma...	7.407e5[S/m]	S/m
恒压热容	Cp	710[J/(kg*K)]	J/(kg·K)
相对介电常数	epsilo...	1	1
密度	rho	4940[kg/m^3]	kg/m³
导热系数	k_iso ;...	7.5[W/(m*K)]	W/(m·K)
相对磁导率	mur_is...	1	1
热膨胀系数	alpha_...	7.06e-6[1/K]	1/K
杨氏模量	E	105[GPa]	Pa
泊松比	nu	0.33	1

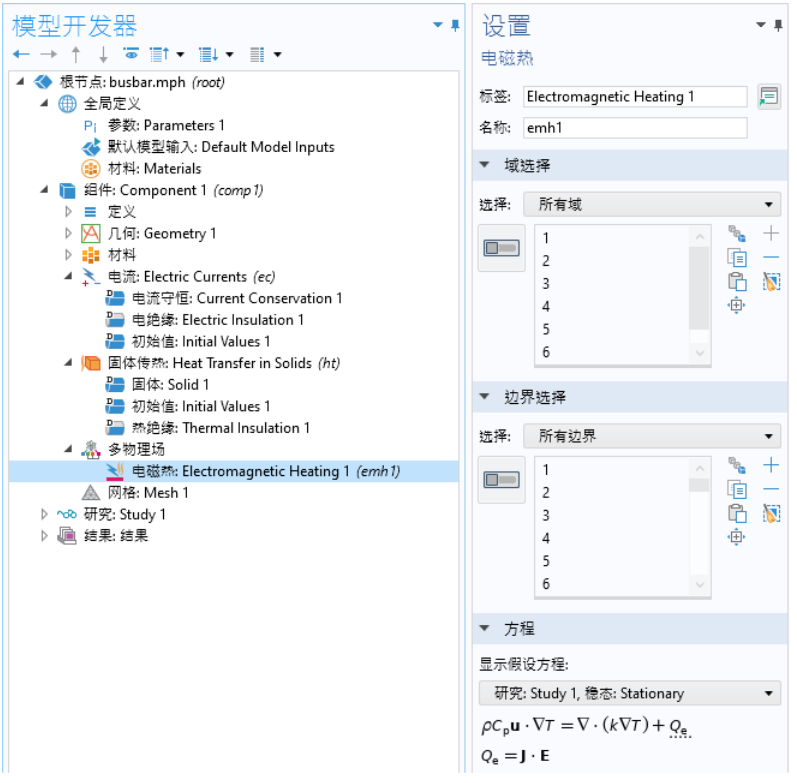
10 您可以通过以下任意方式来关闭**添加材料**窗口：单击右上角的关闭图标，或者在功能区**主屏幕**选项卡的**材料**组中单击**添加材料**切换按钮 。



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**和**多物理场**节点旁边的箭头将其展开。



节点图标 ( ) 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。

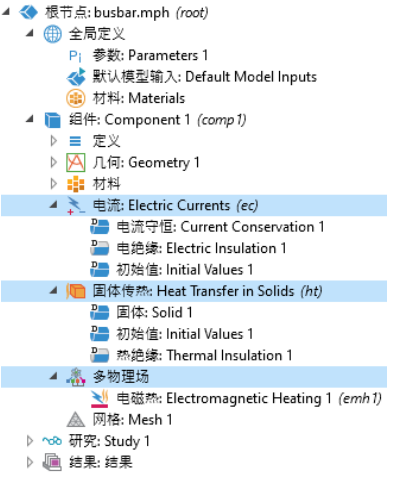
例如，默认的方程形式（无论是稳态方程还是瞬态方程）是从“模型向导”中添加的研究继承的。本例中为稳态研究，方程形式是焦耳热方程组的稳态版本。对于“焦耳热”多物理场接口，方程组将温度和电势作为因变量。

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**显示更多选项**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。

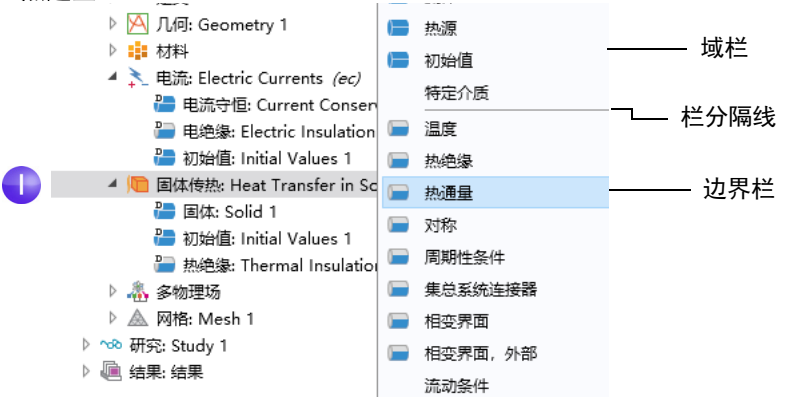
电流节点下的**电流守恒**节点表示域层的电流守恒，而**电绝缘**节点则包含**电流**的默认边界条件。

固体传热节点下的域层**固体**节点表示热量守恒，**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**节点包含用于求解稳态问题的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。

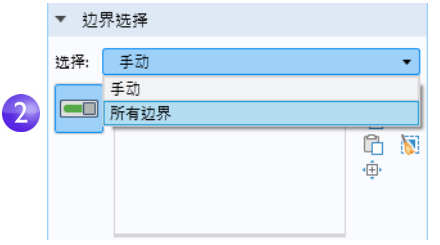
1 右键单击**固体传热**节点。在上下文菜单的第二栏（边界栏）中选择**热通量**。



2 在**热通量**的**设置**窗口中，从**选择**列表中选择**所有边界**。

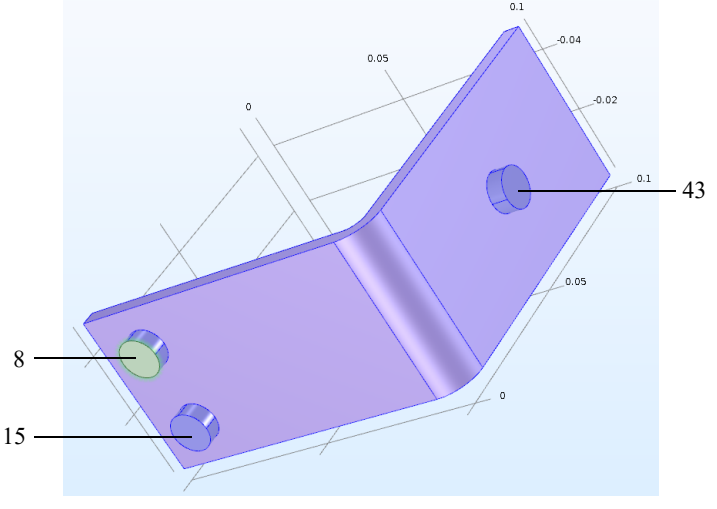
假设周围环境既不会加热也不会冷却圆形螺栓边界。

下一步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 旋转母线板以查看其背面。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。移除边界 8、 15 和 43。

3 再次确认：边界 8、 15 和 43 已从 “选择” 列表中移除。



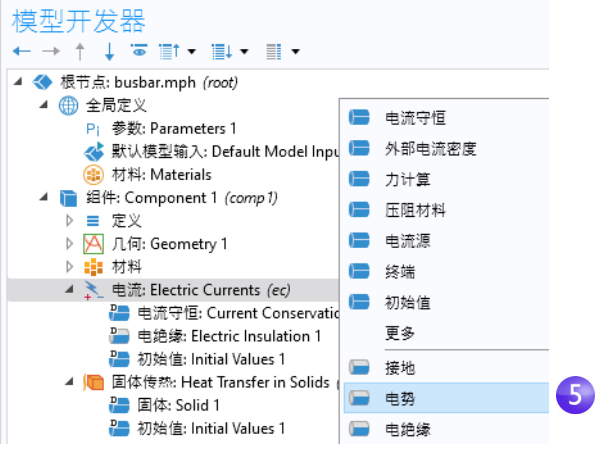
4 定位到**热通量**的**设置**窗口，在**热通量**栏中选择**对流热通量**作为**通量类型**。在**传热系数**框 h 中，输入 htc。

此参数有两种输入方式：在第 77 页的“全局定义”中的**参数**表中输入或者随几何导入。

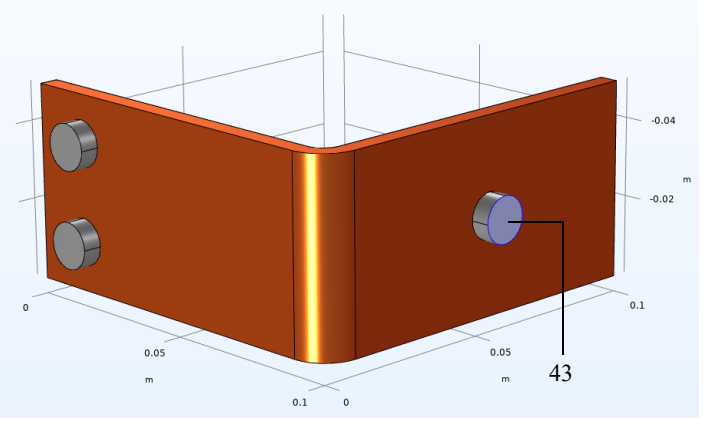
“传热模块”提供了用于传热分析的更高级边界条件。例如，包含以下功能：给出总沉积功率，或为常见自然对流场景（如水平或垂直壁）设置边界条件等。

我们将继续通过以下步骤来设置电流的边界条件：

5 在**模型开发器**窗口中，右键单击**电流**节点 。在上下文菜单的第二栏（边界栏）中选择**电势**。**电势** 节点会添加到模型树中。

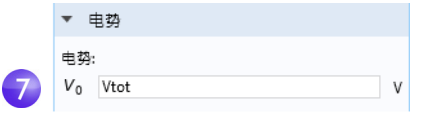


6 将鼠标指针移到单个钛螺栓的圆形面上，使其突出显示，然后单击将其（边界 43）添加到**选择**列表。

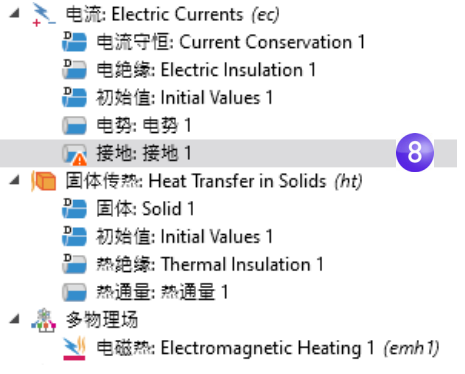


7 在**电势设置**窗口的**电势**框中，输入 `Vtot`。

最后一步是将剩余的两个螺栓表面设为接地。



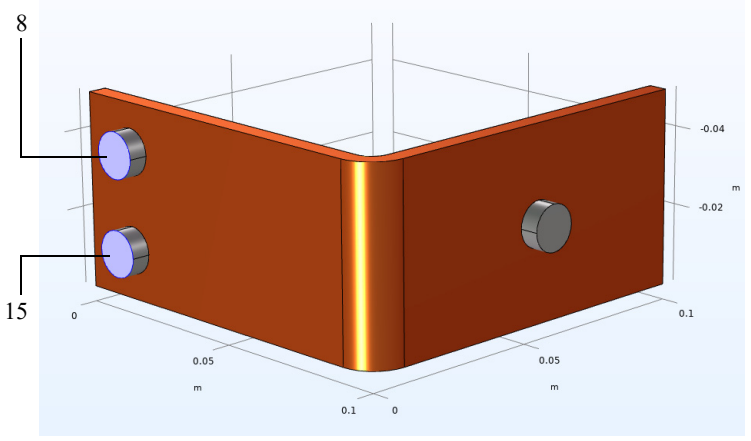
8 在**模型开发器**窗口中，右键单击**电流**节点。在上下文菜单的边界栏中选择**接地**。**接地**节点会添加到模型树中。此时，模型树节点序列应与下图相符。



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。

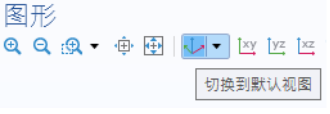
9 在**图形**窗口中，单击余下的其中一个螺栓，将其添加到**选择**列表中。

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 会添加到**接地**边界条件的选择列表中。

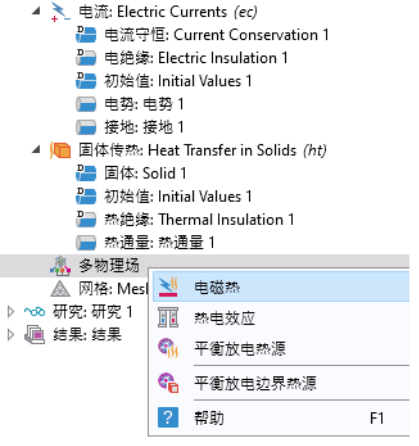
10 在**图形**工具栏中，单击**切换到默认视图**按钮 。



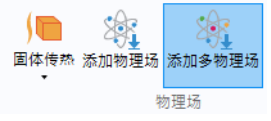
“AC/DC 模块”提供更高级的边界条件用于电磁分析，例如可以给出边界上的总电流。

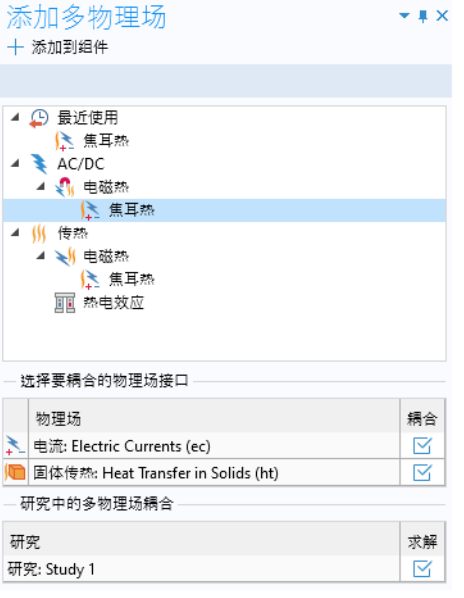
手动组合物理场接口

除了使用预配置的**焦耳热**多物理场接口以外，您还可以手动组合**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，您也可以单击功能区的**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。





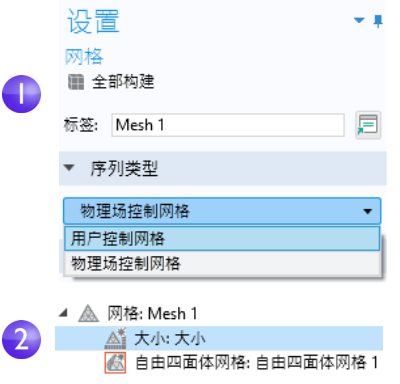
网格

最简单的网格划分方式是创建非结构化的四面体网格，这非常适用于母线板模型。或者，您也可以创建多个网格划分序列，如第 134 页的“添加网格”所示。

默认情况下，软件会创建物理场控制的网格。在大多数情况下，您可以直接跳到**研究**节点进行求解。在本练习中，我们将研究这些设置，以便将网格设置参数化。

1 在**模型开发器**窗口中，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，该值略小于最大单元大小。
- 在**曲率因子**框中输入 0.2。**曲率因子**可以确定弯曲边界上的单元数；值越小，生成的网格越细化。

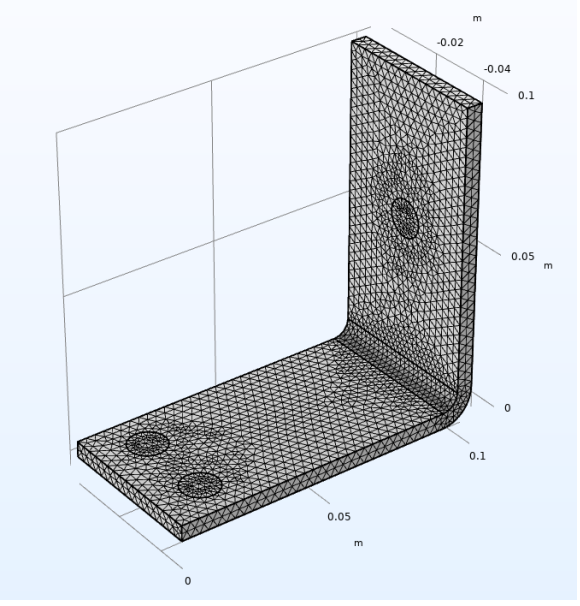
其他两个参数保持不变。

最大单元增长率可以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 右上角显示的星号 (*) 表示该节点处于编辑状态。

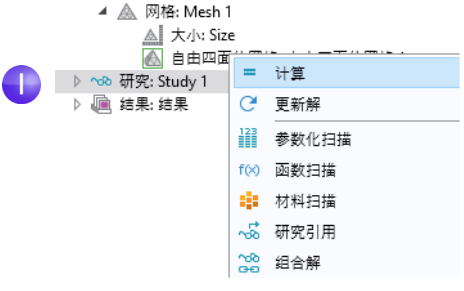
4 单击**大小设置**窗口中的**全部构建**按钮 ，以创建如下图所示的网格：



此外，您也可以在功能区**主屏幕**选项卡中单击**构建网格**。

研究

1 要运行仿真，可以在**模型开发器**窗口中右键单击**研究 1** 并选择**计算** 。此外，也可以按 F8 或在功能区的**主屏幕**选项卡中单击**计算**。

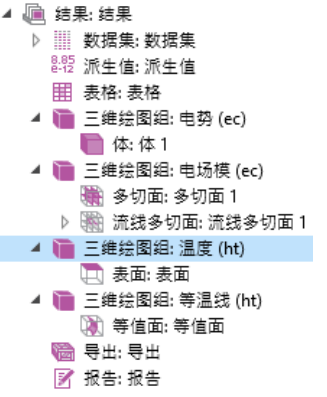


研究节点 会基于选定的物理场和研究类型自动定义仿真的解序列。在本例中，仿真仅需几秒钟便可完成求解。在求解过程中会生成两个**收敛**图，您可以通过**图形**窗口旁边的选项卡进行访问。这些绘图显示了**研究**中采用的不同求解器算法的收敛进度。

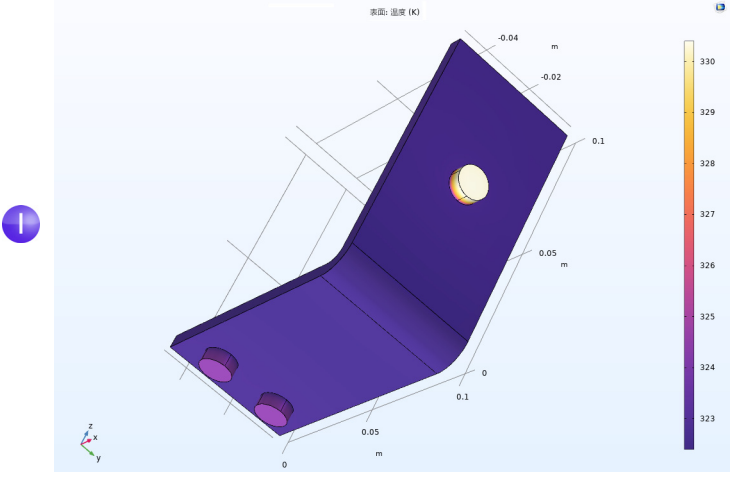
结果

默认情况下，**结果**节点中会生成四个绘图组：**电势**的**体**图、**电场模**（电场大小）和**电场**的**多切面**和**流线多切面**图、**温度**的**表面**图以及包含温度的**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 在**图形**窗口中单击并拖动图像，以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 。

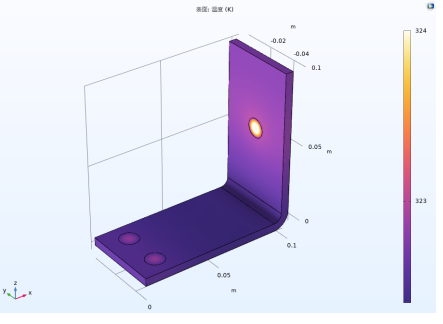
现在，您可以手动设置颜色表范围，将铜零件上的温差可视化。

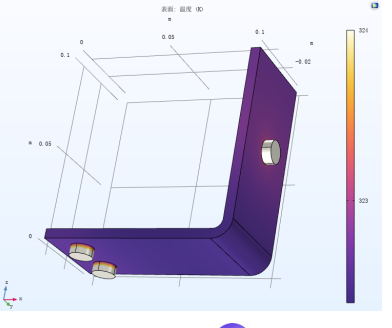
3 在模型树中展开**结果** > **温度**节点 ，然后单击**表面**节点 。

4 在**表面**的**设置**窗口中，单击**范围**以展开该栏。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 。

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，以旋转母线板并查看其背面。



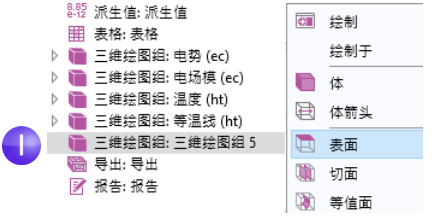


温度分布是横向对称的，一个垂直镜像平面在下部两个钛螺栓之间延伸，并穿过上部螺栓的中心。在这种情况下，模型不需要太多计算资源，您可以对整个几何进行建模。对于更复杂的模型，可以考虑使用对称来减少计算需求。

选择**图形**窗口工具栏中的**切换到默认视图**。

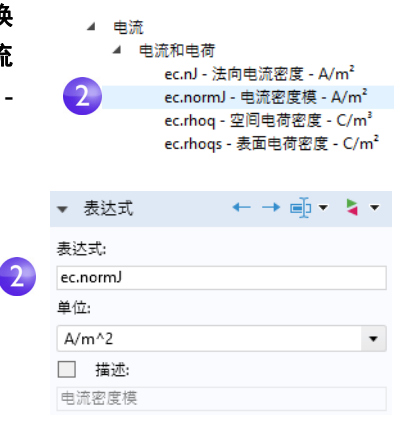
然后，生成**表面**图来显示设备中的电流密度。

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**结果** 并添加**三维绘图组**。在**标签**框中输入**电流密度**，为绘图组提供一个描述性名称。右键单击**三维绘图组 5** 并添加**表面** 节点。



2 在**表面设置**窗口的**表达式**栏中，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 - A/m²**，然后双击或按 Enter 进行选择。

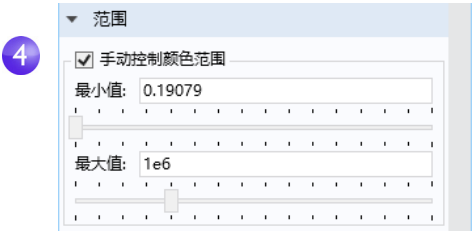
`ec.normJ` 是电流密度矢量的幅值或绝对值的变量。如果您知道变量名称，也可以在**表达式**框中键入 `ec.normJ`；此外，还可以使用自动完成功能，即键入 `norm` 然后按 Ctrl+/ 来获取变量名称建议。



3 单击**绘制**按钮。

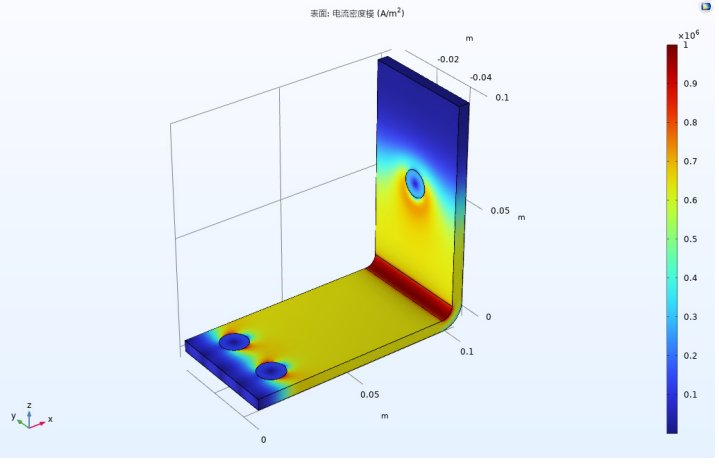
由于同螺栓接触的边上具有较高的电流密度，因此**图形**窗口中显示的绘图颜色几乎是均匀的。下一步是手动更改颜色表范围，为电流密度分布生成可视化效果图。

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。然后，在**最大值**框中输入 1e6 来替换默认值。

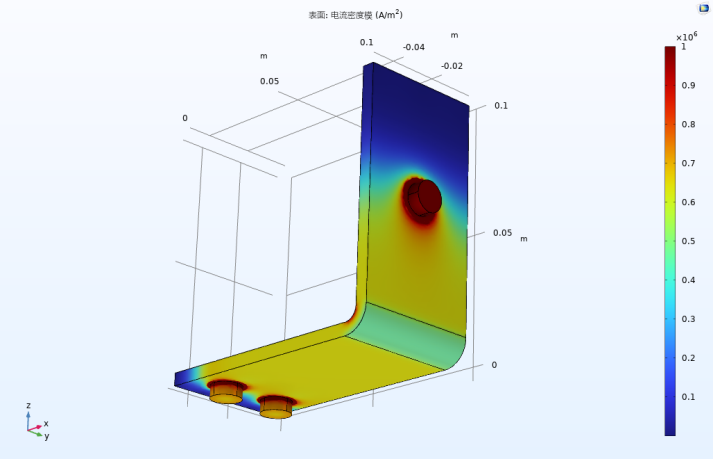


5 单击**绘制**按钮 。

生成的绘图显示，电流在母线板的 90 度弯曲处采用最短路径。请注意，螺栓外母线板的边几乎没有承载任何电流。



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

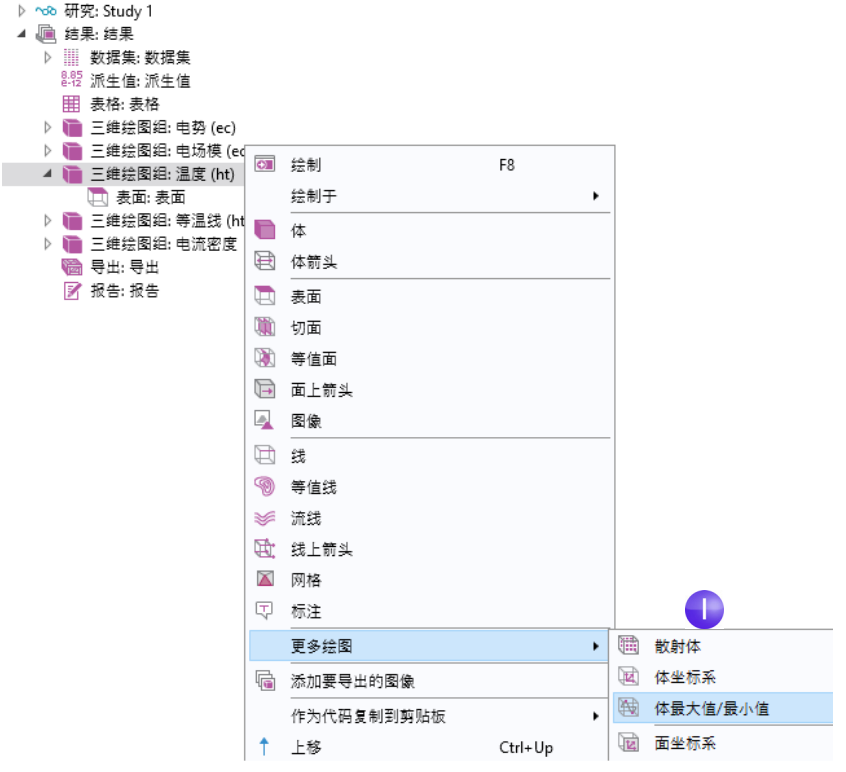


完成后，单击**图形**工具栏中的**切换到默认视图**按钮 。

获取最高和最低温度

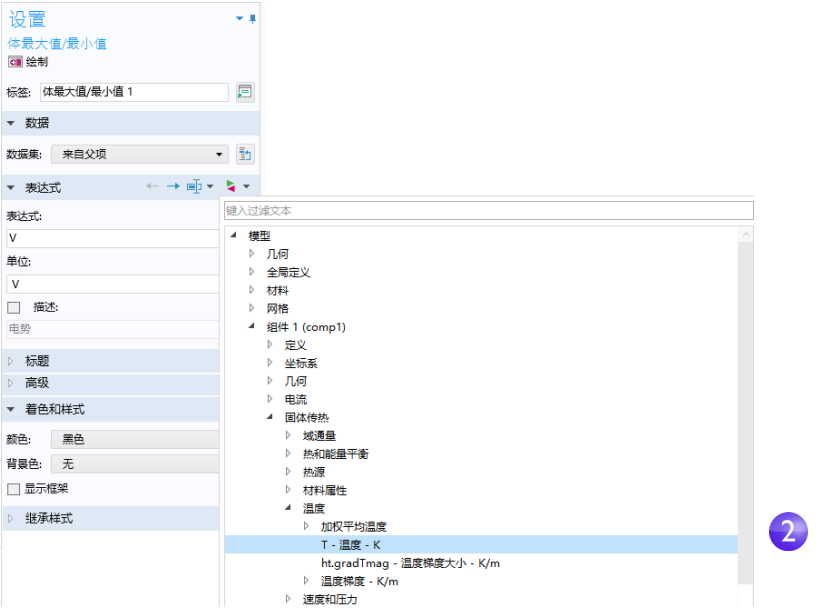
您可以轻松获取母线板中的最高和最低温度值及其在母线板中的位置。

1 右键单击**结果 > 温度** 并选择**更多绘图 > 体最大值 / 最小值**。

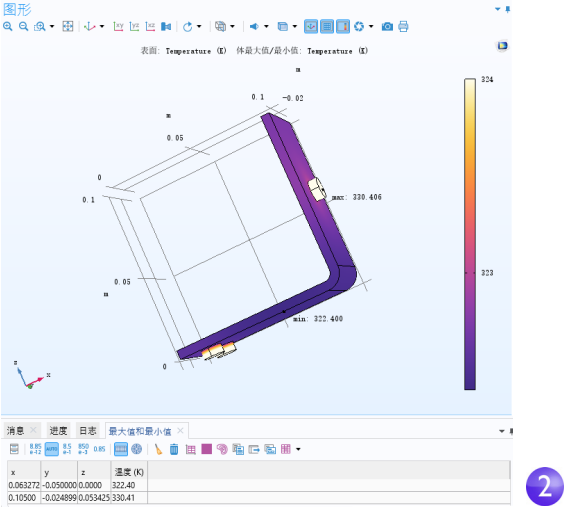


2 在**体最大值/最小值设置**窗口的**表达式**栏下，单击**替换表达式**按钮 。转至**模型 > 组件 1 > 固体传热 > 温度 > T - 温度 - K**，然后双击或按 Enter 进行选择。此

外，您也可以在后处理变量树上方的搜索框中搜索**温度**，或者手动输入 T。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。对于很细化的网格，不论是哪个版本，得到的结果都相同。

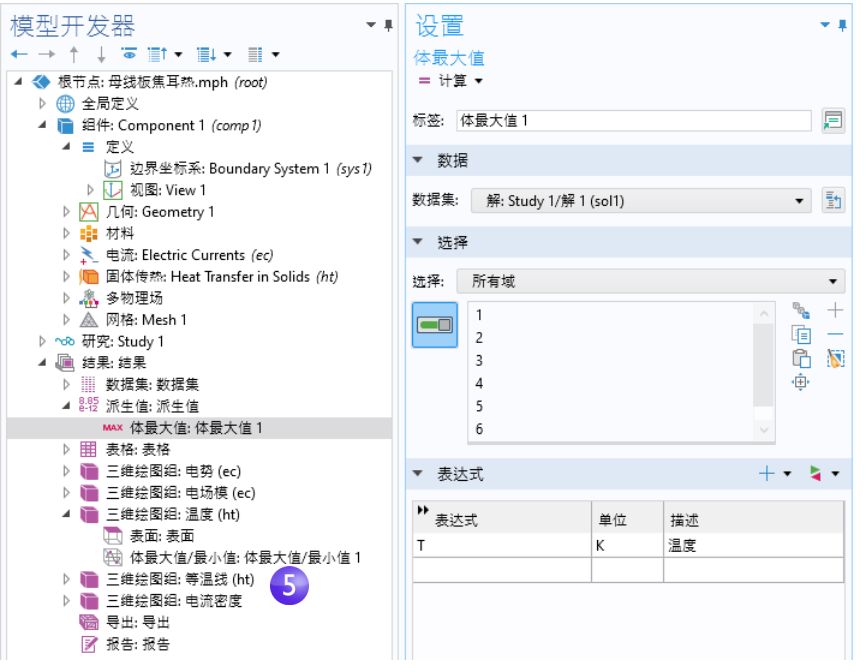


除上述绘制最大值和最小值的方法以外，您还可以使用**派生值**节点或**计算组**来获取纯数值输出。以下步骤演示如何使用**派生值**。

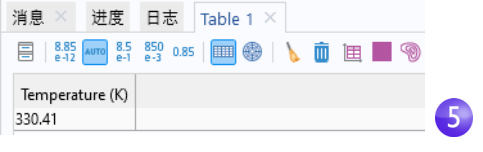
3 在模型树的**结果**部分右键单击**派生值** 节点，然后选择**最大值 > 体最大值** MAX。

4 定位到**体最大值**的**设置**窗口，在**选择**栏中选择**所有域**。

5 在**表达式**表的第一行输入 T（除非自动填充）表示温度，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。



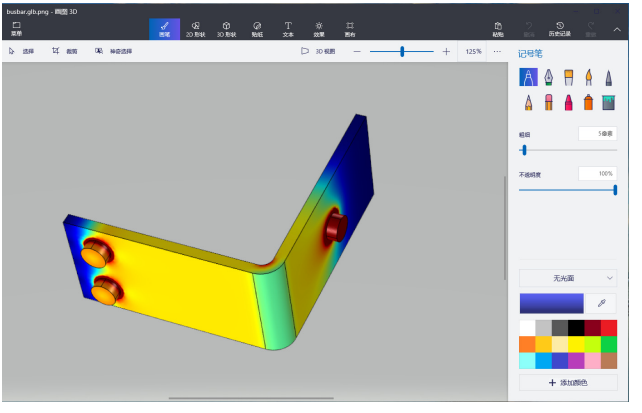
下一步，您可以创建模型缩略图。

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**窗口的**结果**节点下单击相应的绘图节点。然后单击根节点（模型树中的第一个节点）。在“根节点”**设置**窗口的**缩略图**下方，单击**基于“图形”窗口设置**。

除此之外，您也可以通过其他两种方式基于绘图来创建图像。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，另一种是将**图像**节点 添加至**导出**节点来创建图像文件。右键单击所需的绘图组，然后选择**添加要导出的图像**。

您可以使用**图像快照**按钮将**结果**可视化绘图导出为 glTF™（文件扩展名为 `.glb`）格式。随后，可以在 Microsoft® 的 Paint 3D 等三维可视化软件中打开这些文件，如下图所示。（如果您运行的是 Windows® 10 或 11 系统，则可以实现这一功能。）此外，您也可以在线查找在网页浏览器中运行的 glTF™ 查看器。



请确保在此阶段保存模型。这个模型版本 `busbar.mph` 将在接下来的几个教程中被重复使用并重命名。另外，对于后续教程，您可以使用“案例库”的 **COMSOL Multiphysics > 多物理场**分支下的母线板文件。

使用 App 开发器构建 App

本节简要介绍如何使用“App 开发器”来创建 App，采用母线板模型进行演示。每个 App 都有一个专门用于与母线板模型交互的用户界面，其中包含长度、宽度和外加电压的输入框。输出结果为最高温度和温度图。

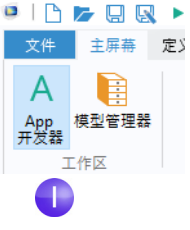
您将学习如何使用 “新建表单” 向导、采用两种不同的布局模板、以两种不同的方式来快速创建 App。该向导用于创建一个或多个包含用户界面组件的表单，这些组件称为 “表单对象”。该向导可供您快速访问 “App 开发器” 中可用于创建 App 的所有表单对象的子集。在下面的示例中，您将学习如何添加输入框、数值输出、图形和按钮。如需有关开发 App 的详细信息，请参阅 《App 开发器简介》手册。

第一个示例演示如何使用**单个表单**模板创建基于单个表单的 App。该模板使得通过拖动来交互地移动按钮和编辑文本框变得非常容易。不过，不允许您在改变 App 窗口的大小时调整图形的大小。第二个示例演示如何使用**基本**模板来创建具有多个表单、子窗口和一个功能区的 App。使用该模板可以自动创建具有可调整大小的图形窗口的 App。

使用新的单个表单创建 APP

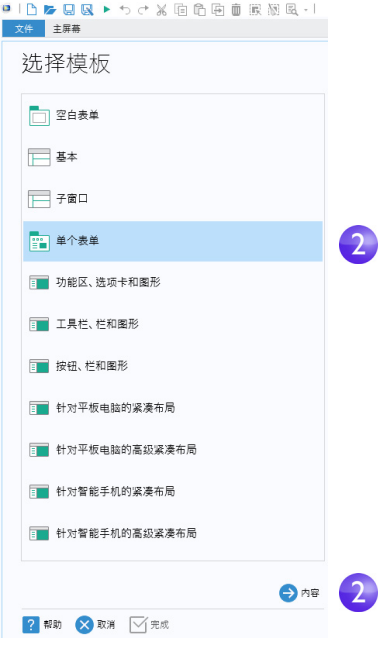
1 本例使用母线板模型。您可以从 “案例库” 的 **COMSOL Multiphysics > 多物理场**分支下打开母线板文件；或者，如果您在完成第 109 页的 “示例 2” 时保存了模型，则可以打开已保存的 `busbar.mph` 文件。

如要从 “模型开发器” 切换到 “App 开发器”，可以在功能区中单击**主屏幕**选项卡最左侧的**工作区**栏中的 **App 开发器**按钮。



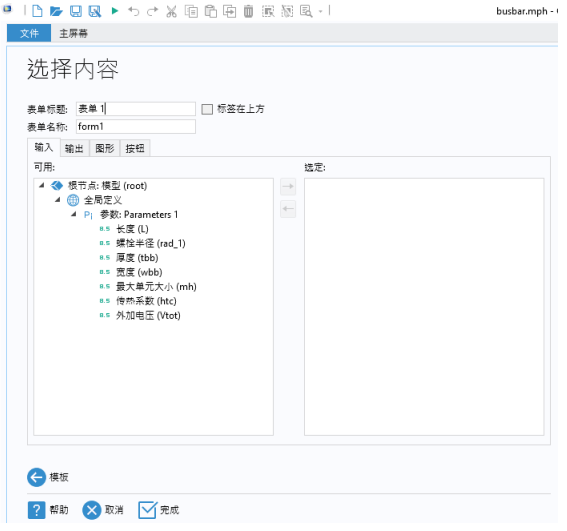
2 要创建新表单，单击功能区中的**新建表单**按钮。此操作将创建新的全局表单。

在向导的**选择模板**页面，选择**单个表单**。



单击**内容**继续操作。

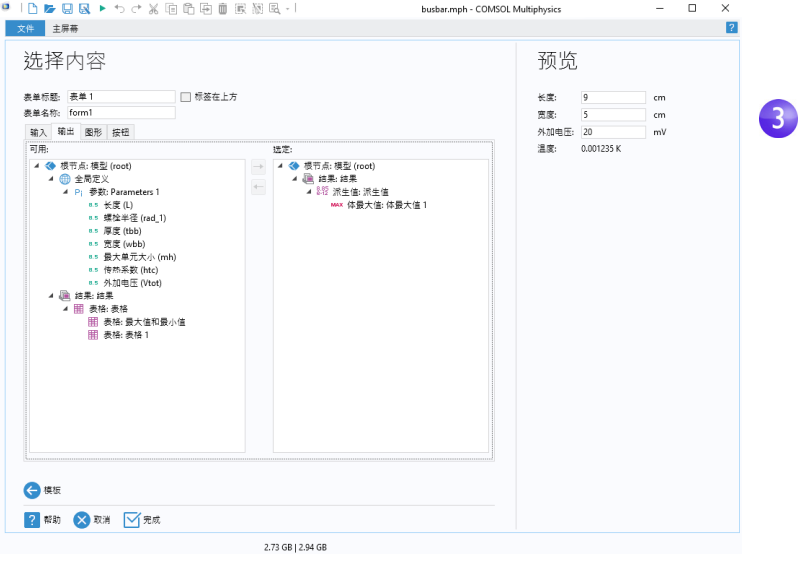
此时会显示**选择内容**页面。



2

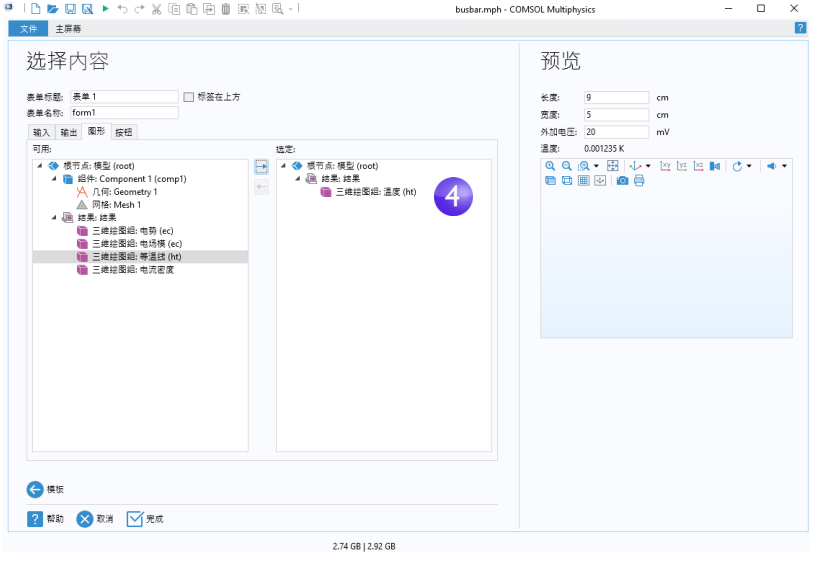
其中包含四个选项卡：**输入**、**输出**、**图形**和**按钮**。您可以在**输入**选项卡中双击树中的参数，使其显示在 App 的用户界面中。对于此 App，我们将选择一些参数作为输入，并选择最高温度作为输出。

3 在**输入**页面中双击以下每个参数：**长度 (L)**、**宽度 (wbb)** 和**外加电压 (Vtot)**。此外，在**输出**选项卡中双击**派生值**下的**体最大值**。

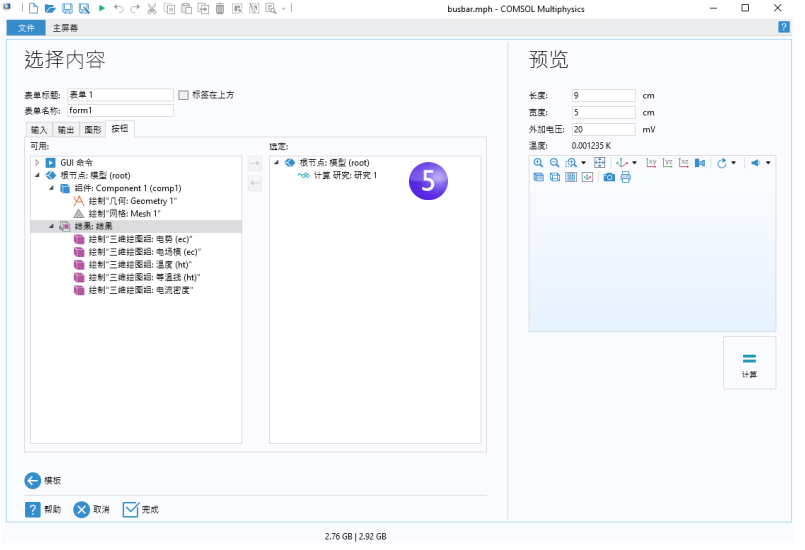


右侧的**预览**栏显示了用户界面布局。

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。

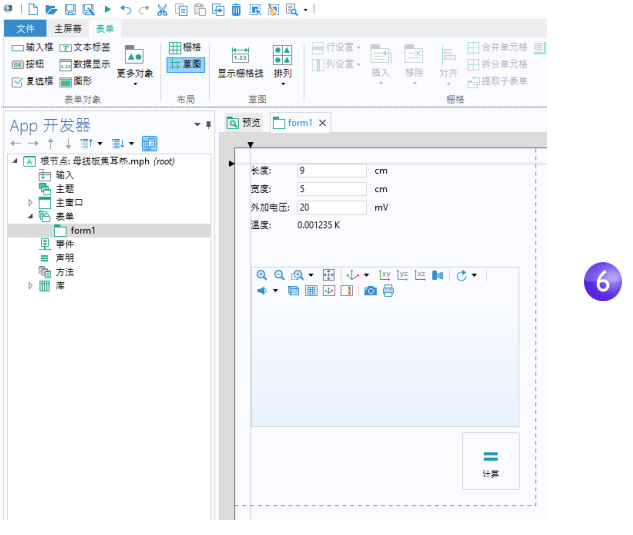


5 单击向导中的**按钮**选项卡，然后双击**计算研究**。此时，**计算**按钮会显示在**预览**区域中图形对象的下方。

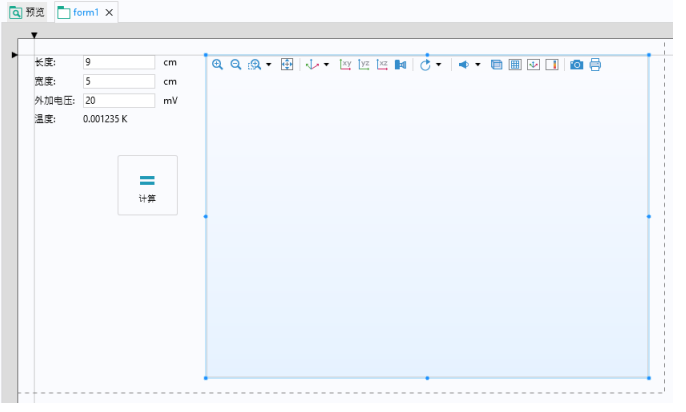


6 最后，单击**完成**以接受设置并关闭向导。

关闭“表单向导”后，会打开“表单编辑器”。您可以在其中拖放表单对象并添加新的表单对象。默认视图显示表单的“预览”效果。双击 **form1** 以启用编辑。



7 您可以通过将图形对象拖动到输入框的右侧，并将按钮拖动到输入框正下方的位置，来重新排列用户界面，如下图所示。蓝色指导线有助于对齐对象。

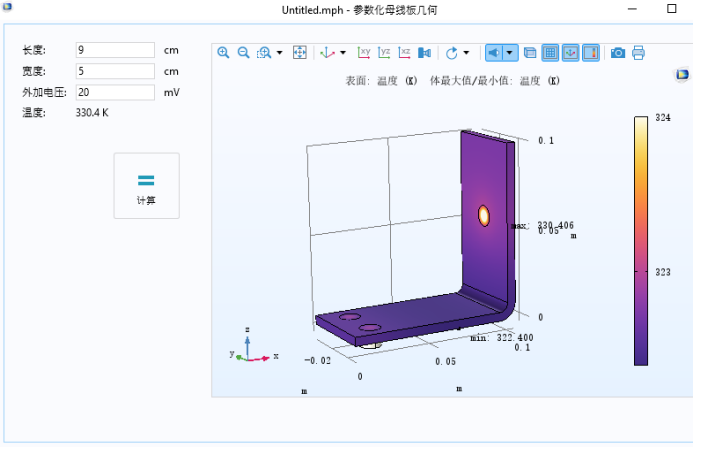


您可以拖动蓝色手柄来放大或缩小图形对象。

8 您可以单击功能区中的**测试 App** 进行测试。

8

此外，也可以单击“快速访问工具栏”中的相应按钮。此操作会创建 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。

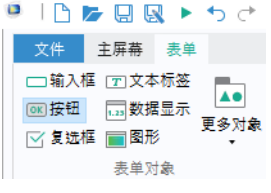


8

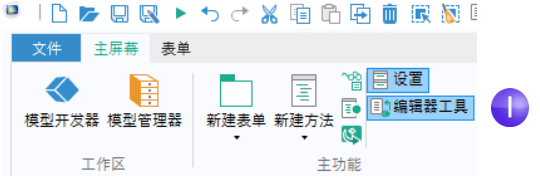
9 现在，您可以尝试不同的**长度**值，然后单击**计算**。

添加按钮

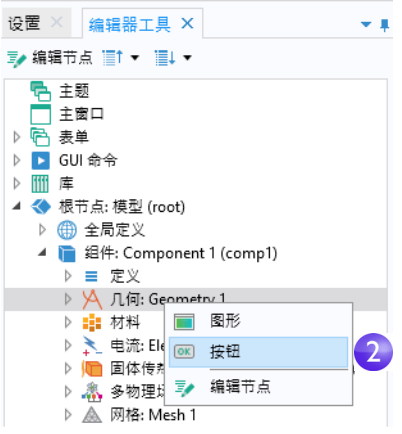
建议您在开始计算之前先预览几何，这可以通过添加按钮来轻松实现。您可以通过以下两种方式来添加按钮：单击功能区的**表单**选项卡的**表单对象**栏中的**按钮**（如下图所示）；或者使用**编辑器工具**窗口。在本例中，我们使用第二种方法。



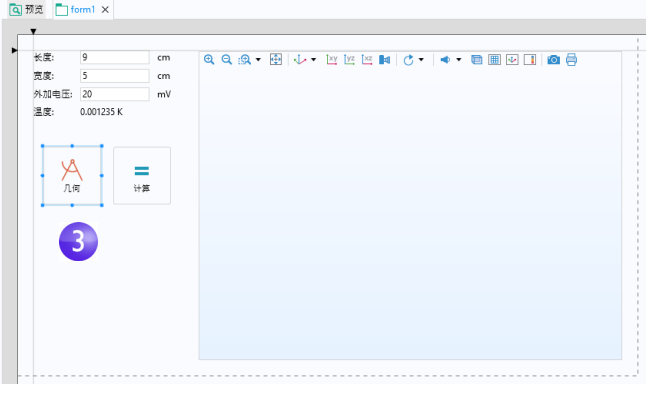
1 首先，选择功能区**主屏幕**选项卡中的相应按钮，确保**编辑器工具**窗口可见。



2 在**编辑器工具**树中，右键单击**几何**节点并选择**按钮**。



3 将**几何**按钮拖动到**计算**按钮的左侧。



每个按钮都有一个对应的命令序列，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。您可以双击按钮来打开**设置**窗口（如果尚未打开）。

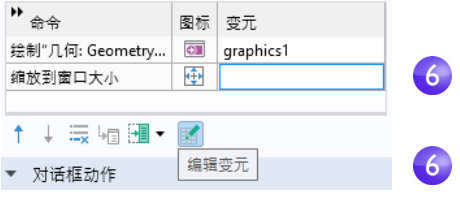
4 双击**几何**按钮以查看其**设置**窗口。命令序列显示在**选择要运行的命令**栏中命令树的下方。

在本例中，**几何**的命令序列包含一个用于绘制几何的命令。输入变元包含有关将几何绘图发送到哪个图形窗口的信息。本例中的图形对象为 `graphics1`。

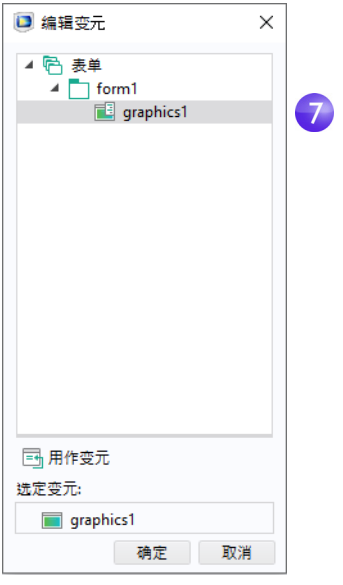
要自动调整轴设置，可以添加**缩放到窗口大小**命令。

5 在**选择要运行的命令**栏中，定位到 **GUI 命令 > 图形命令**下方的**缩放到窗口大小**命令，然后双击该命令将其添加到命令序列。

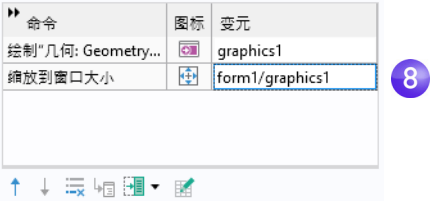
6 现在，为**缩放到窗口大小**命令创建输入变元。单击**缩放到窗口大小**旁边的空白编辑框，然后单击**编辑变元**按钮。



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



8 命令序列现已完成。

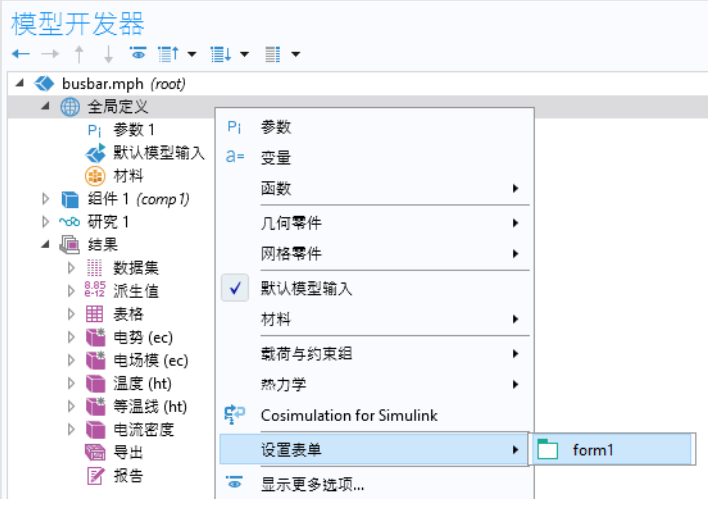


9 为确保新的**几何**按钮正常工作，您可以单击功能区中的**测试 App** 再次对该 App 进行测试。

在“模型开发器”中使用表单

您可以在“模型开发器”中使用不含图形表单对象的表单。例如，可以使用此功能为常见任务或重复性任务创建定制的**设置**窗口。如果您希望在多个会话之间重用定制的**设置**窗口，甚至将其分享给其他用户，可以创建一个插件，如《App 开发器简介》中所述。

为了在 “模型开发器” 中使用在 “App 开发器” 中创建的表单，可以右键单击**全局定义**并从**设置表单**中选择表单。

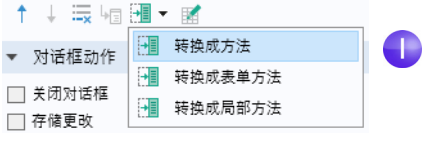


方法

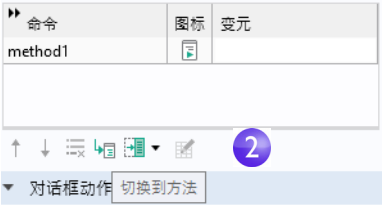
当您需要执行命令序列无法实现的更高级的操作时，可以使用 “方法编辑器” 来编写代码，从而定义用户在执行单击按钮、选择菜单项等操作时要执行的操作。除了从 App 或**设置表单**中调用方法以外，您还可以从功能区的**开发工具**选项卡或模型树的**方法调用**中调用方法。有关更多信息，请参见 《App 开发器简介》。

开始使用 “方法编辑器” 的简单方法是，将现有命令序列转换成一种方法。

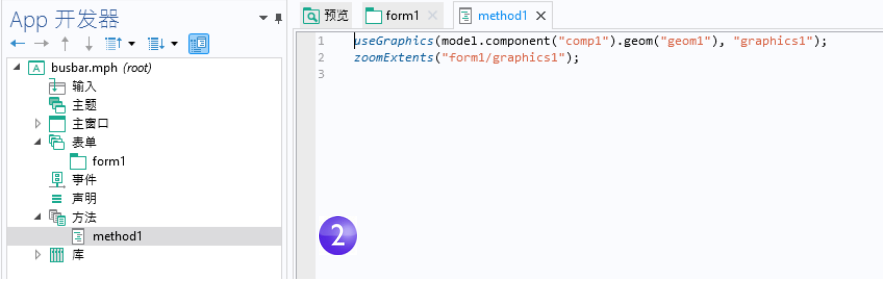
1 在 “App 开发器” 中，再次找到或打开**几何**按钮的**设置**窗口。单击命令序列下方的**转换成方法**按钮。（下拉列表中的其他两个选项用于创建两种类型的局部方法。）



2 要在 “方法编辑器” 中打开该方法，单击命令序列下方的**切换到方法**按钮。



“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**和**缩放到窗口大小**命令。



“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以外，您还可以单击功能区中的**录制代码**。

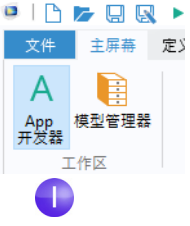
此操作可以为在 COMSOL Desktop 窗口中执行的每个操作生成代码。单击功能区中的**停止录制**，可以停止录制并返回 “方法编辑器”。

使用基本模板创建 App

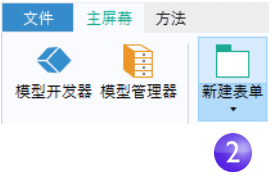
第二个示例演示如何使用**基本**模板来创建包含多个表单、子窗口和一个功能区的 App。使用该模板可以创建具有可调整大小的图形窗口的 App。请注意，您使用模板创建的 App 类型也可以通过手动步骤进行构建，方法是从**空白表单**或**单个表单**模板开始操作；不过，使用模板可以加速这一过程。有关更多信息，请参见 《App 开发器简介》。

本例使用母线板模型。您可以从“案例库”的 **COMSOL Multiphysics > 多物理场**分支下打开母线板文件；或者，如果您在完成第 109 页的“示例 2”时保存了模型，则可以打开已保存的 `busbar.mph` 文件。

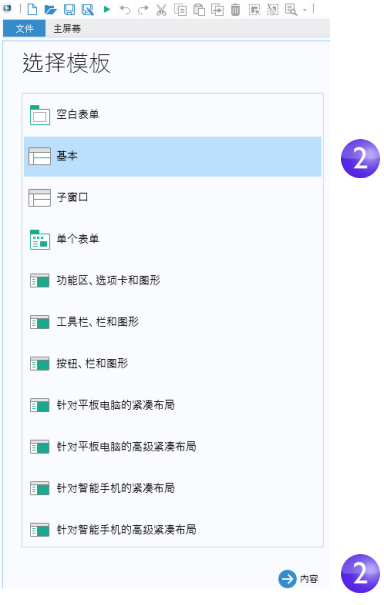
1 如要从“模型开发器”切换到“App 开发器”，可以在功能区中单击**主屏幕**选项卡最左侧的**工作区**栏中的 **App 开发器**按钮。



2 要创建新表单，单击功能区中的**新建表单**按钮。此操作将创建新的全局表单。

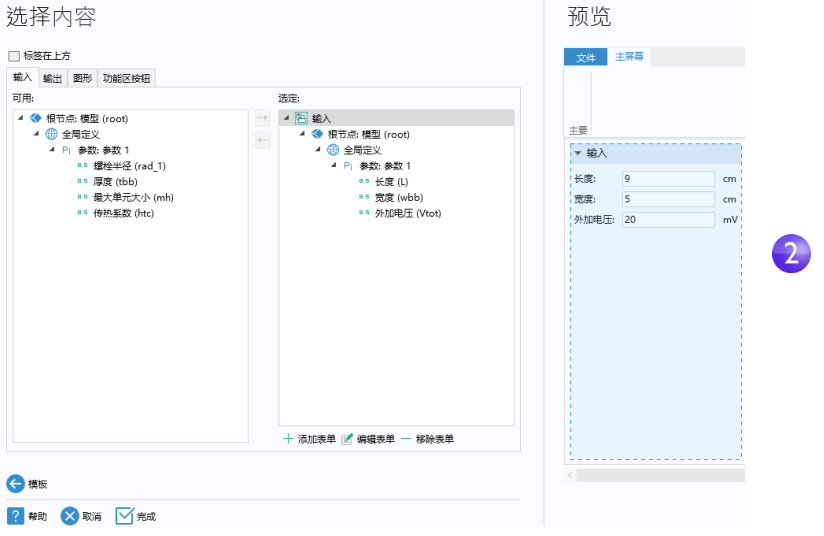


在向导的**选择模板**页面中选择**基本**。



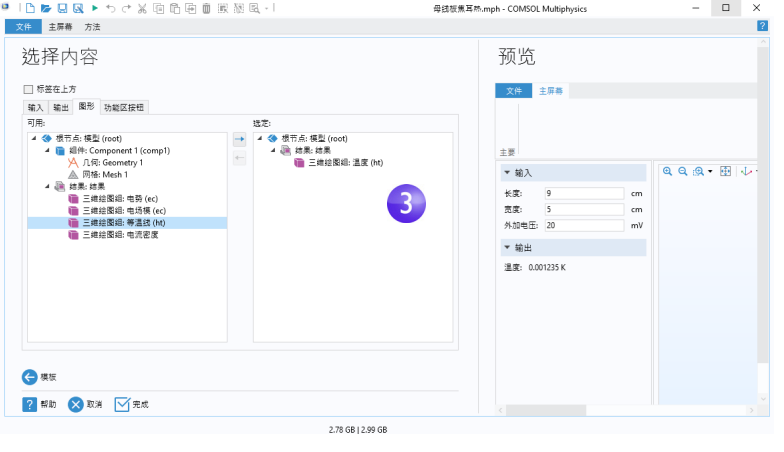
单击**内容**继续操作。

此时会显示**选择内容**页面。



就像使用**单个表单**模板时一样，此页面包含四个选项卡：**输入**、**输出**、**图形**和**功能区按钮**。您可以在**输入**选项卡中双击树中的参数，使其显示在 App 的用户界面中。与前面的示例相同，使用**单个表单**模板，在**输入**选项卡中双击每个参数：**长度 (L)**、**宽度 (wbb)** 和**外加电压 (Vtot)**。此外，在**输出**页面中双击**派生值**下的**体最大值**。

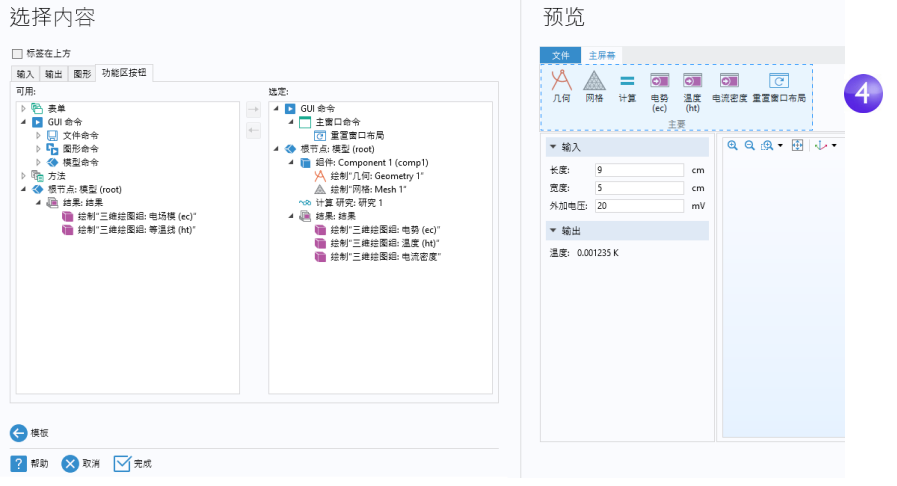
3 继续单击向导中的**图形**选项卡，然后双击**温度**图。**预览**区域将出现一个图形对象占位符。



当使用**基本**布局模板时，该选择决定了 App 启动时显示的默认绘图。

4 **功能区按钮**选项卡显示可通过单击 App 用户界面的功能区中的按钮来运行的模型和 App 树节点。

在下图中，添加了与操作相对应的按钮：**绘制几何**、**绘制网格**、**计算研究**、**绘制电势**、**绘制温度**、**绘制电流密度**、和**重置窗口布局**。

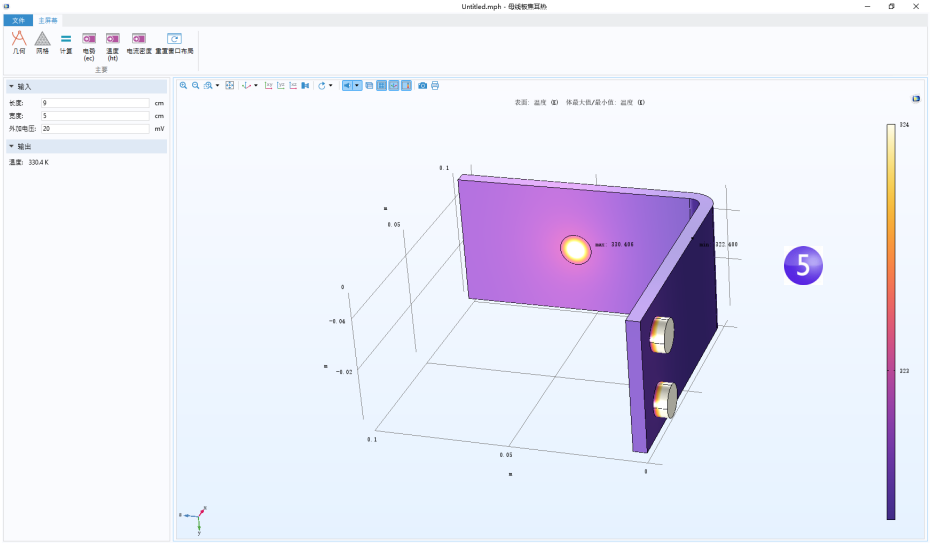


重置窗口布局选项位于 **GUI 命令 > 主窗口命令 > 重置窗口布局**下。该应用程序由两个子窗口组成，一个用于输入输出，一个用于图形。**重置窗口布局**按钮会将该应用程序中的两个子窗口重置为其原始大小。**子窗口**模板与**基本**模板相似，但还允许您分离、移动和停靠子窗口。在本例中，**重置窗口布局**操作会将所有子窗口重新排列为其原始位置和大小。

通过使用 “App 开发器”中的 “主窗口编辑器”，您可以添加用于运行您自己的定制命令序列或方法的功能区按钮。

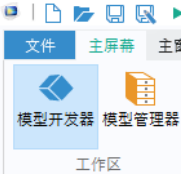
单击**完成**以退出向导。此时软件会自动切换到 “表单编辑器”。

5 您可以单击功能区中的**测试 App** 进行测试。



如需进一步学习如何使用“表单编辑器”和“方法编辑器”，请参阅《App 开发器简介》一书，其中包含有关编写方法的更多信息。如需更深入地了解有关方法的信息，请参阅 *Application Programming Guide* 和 *Application Builder Reference Manual*。

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



高级主题概述

接下来的章节将使您加深对目前为止已执行步骤的理解，并进一步扩展仿真范围，包含热膨胀和流体流动等其他效应。您可以访问以下页面阅读这些附加主题：

- 第 128 页的 “参数、函数、变量和耦合”

- 第 133 页的 “材料属性和材料库”
- 第 134 页的 “添加网格”
- 第 137 页的 “添加物理场”
- 第 159 页的 “参数化扫描”
- 第 171 页的 “并行计算”
- 第 175 页的 “COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器”
- 第 201 页的 “附录 A - 构建几何”

参数、函数、变量和耦合

本节将探讨如何使用参数、函数、变量和非局部耦合。

全局定义和**组件 > 定义**节点包含的功能可以帮助您准备模型输入、非局部耦合以及组织仿真。在第 77 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。

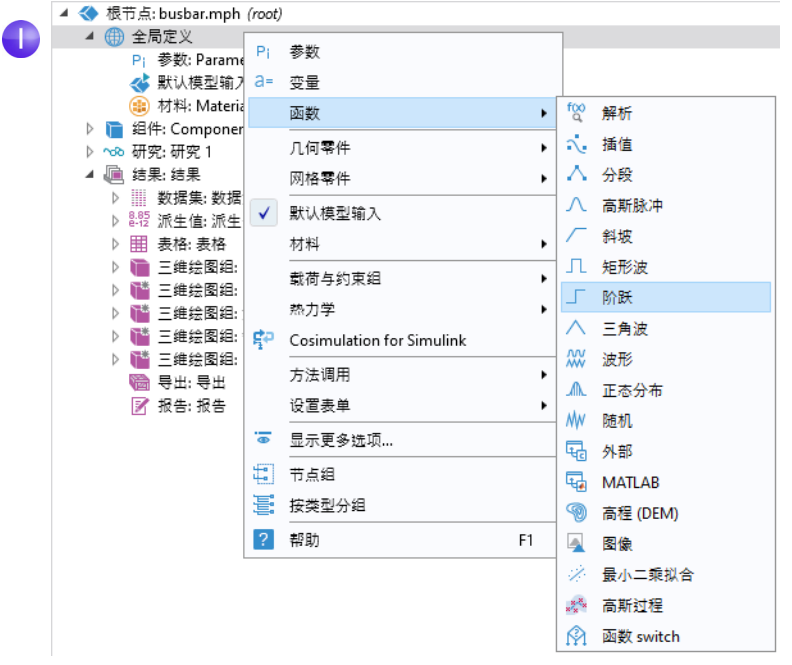
函数可用于**全局定义**和**组件 > 定义**，其中包含一系列预定义的函数模板，这在建立多物理场仿真时非常有用。例如，**阶跃**函数模板可以创建平滑的阶跃函数，用于定义不同类型的空间或时间过渡。

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 `Vtot`。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。

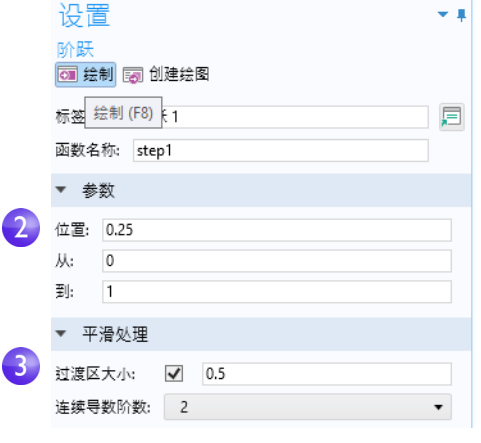
定义函数

在本节中，您可以继续使用在上一节创建的模型文件。如果第 109 页的文件 `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** 。



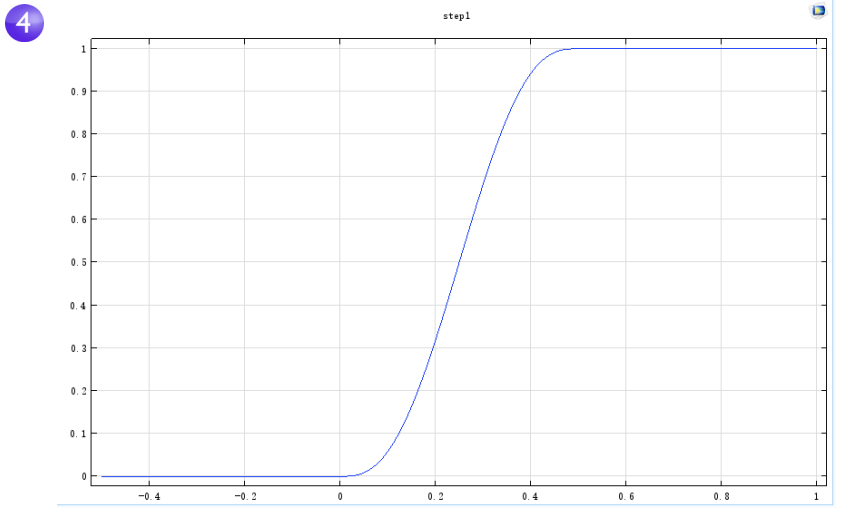
2 在**阶跃设置**窗口的**位置**框中，输入 0.25，以设置值为 0.5 的阶跃函数中心的位置。



3 单击**平滑处理**展开该栏，并在**过渡区大小**框中输入 0.5，以设置平滑间隔的宽度。保留**连续导数阶数**的默认值 2。

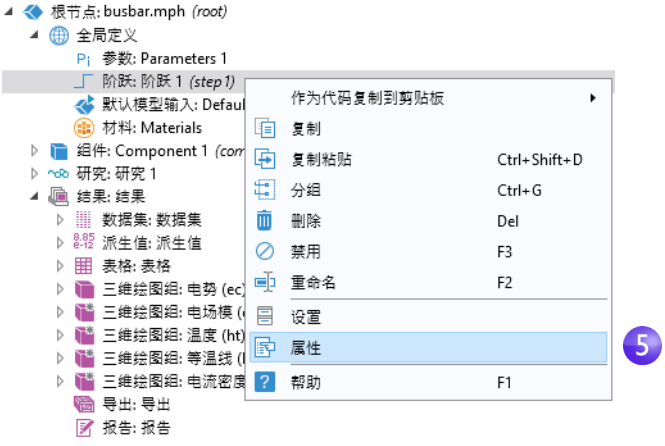
4 在**阶跃**的**设置**窗口中，单击**绘制**按钮 。

如果得到的绘图与下图相符，说明您已正确定义该函数。



此外，您还可以为函数添加注释，使描述信息更为具体。

5 右键单击**模型开发器**窗口中的**阶跃 1** 节点，然后选择**属性**。



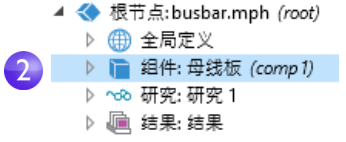
6 在**属性**窗口中，输入所需的任何信息。完成后，右键单击**属性**选项卡并选择**关闭**。您在此处使用的特殊字符和标记标签将显示在从**报告**节点生成的报告中。

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。

1 右键单击**组件 1** 节点 并选择**重命名**（或按 F2）。

2 在**重命名 “组件”**窗口中，输入母线板。单击**确定**并保存模型。



定义非局部耦合与探针

右键单击**母线板 (comp1)** 下的**定义**节点，以引入非局部耦合，用于计算螺栓与电气设备接触边界上任意**母线板 (comp1)** 变量的积分。您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，用于计算总电流。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。

定义节点中的**非局部耦合**的使用范围非常广泛。**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、汇、属性或模型方程的任何其他贡献项。**探针** 用于监视求解进度。例如，您可以在瞬态仿真中跟踪某个关键点的解，或参数化研究中的每个参数值。

您可以在第 159 页的 “参数化扫描” 中找到使用平均算子的示例。另请参见第 231 页的 “函数” 以获取可用的函数列表。

如需了解使用定义的更多信息，您可以在**模型开发器**窗口中单击**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。此外，您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。

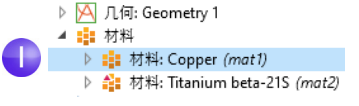
“材料库”插件包含 3800 多种材料，以及上万个温度相关的属性函数。此外，许多附加产品都包含与其应用领域相关的材料库。

首先，我们研究如何为现有材料添加属性。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进行操作。

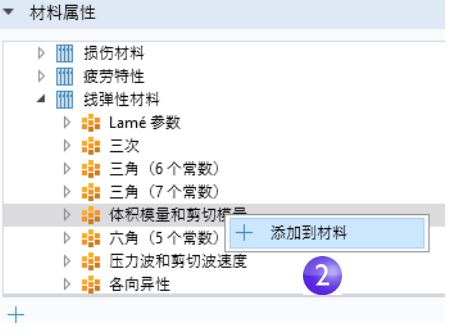
1 在**模型开发器**窗口的**材料**节点下，单击 **Copper** 。



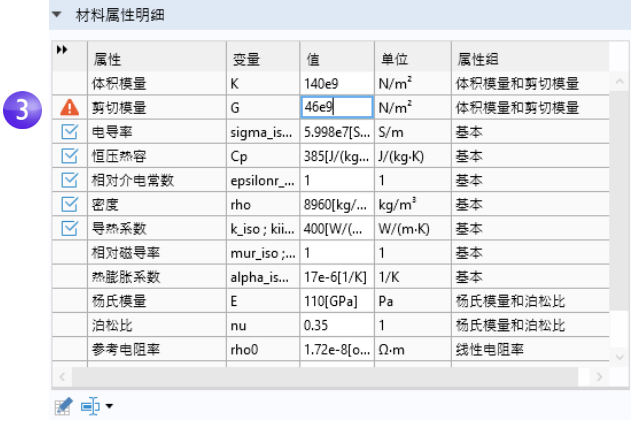
2 在**材料**的**设置**窗口中，单击以展开**材料属性**栏，其中包含所有可定义属性的列表。

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**。

现在，您便可以在模型中定义铜的体积模量和剪切模量。



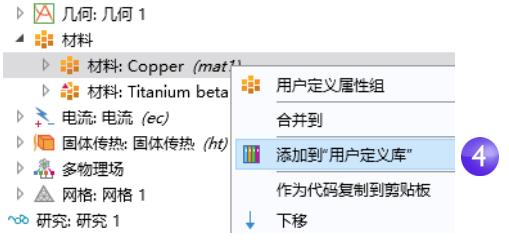
3 在 **Copper** 节点中，定位到**材料属性明细**栏。此时可以在表格中看到**体积模量**和**剪切模量**行。警告符号 ⚠ 表示值尚未定义。要定义值，您可以单击**值**列，然后在**体积模量**行中输入 140e9，并在**剪切模量**行中输入 46e9。



属性	变量	值	单位	属性組
体积模量	K	140e9	N/m²	体积模量和剪切模量
剪切模量	G	46e9	N/m²	体积模量和剪切模量
电导率	sigma_is...	5.998e7[S...	S/m	基本
恒压热容	Cp	385[J/(kg...	J/(kg·K)	基本
相对介电常数	epsilonr_...	1	1	基本
密度	rho	8960[kg/...	kg/m³	基本
导热系数	k_iso ; kii...	400[W/(...	W/(m·K)	基本
相对磁导率	mur_iso ;...	1	1	基本
热膨胀系数	alpha_is...	17e-6[1/K]	1/K	基本
杨氏模量	E	110[GPa]	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[o...	Ω·m	线性电阻率

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

4 在**模型开发器**窗口中，右键单击 **Copper** 并选择**添加到 “用户定义库”**。



您可以在功能区的**材料**选项卡中单击**浏览材料**来查看这个库。

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，可以通过研究步骤进行访问。在研究中，您可以选择在特定的仿真中使用哪种网格。

在母线板模型中，现在添加了另一个网格节点，以创建更粗化的网格 （具有更大的单元）。

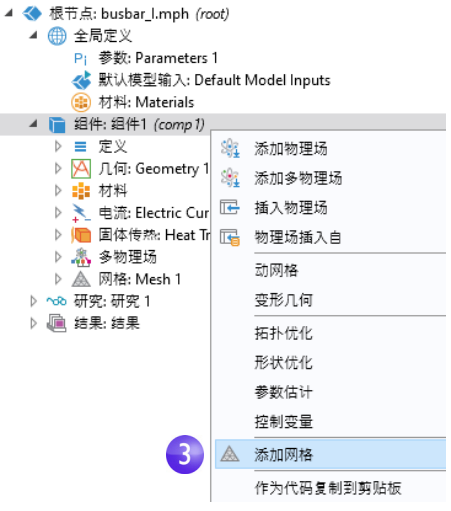
添加网格

1 打开之前在第 109 页保存的模型 busbar.mph。

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

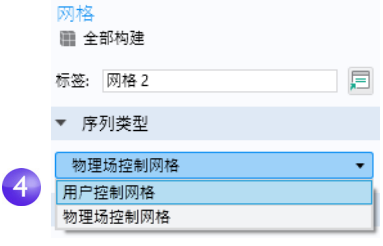
3 要添加另一个网格节点，右键单击**组件 1** 节点 并选择**添加网格** 。（如果您遵循第 128 页的“参数、函数、变量和耦合”中的操作说明，则名称不是**组件 1**，而是**母线板**。）

通过添加另一个**网格**节点，可以创建一个同时包含**网格 1** 和**网格 2** 的**网格**父节点。

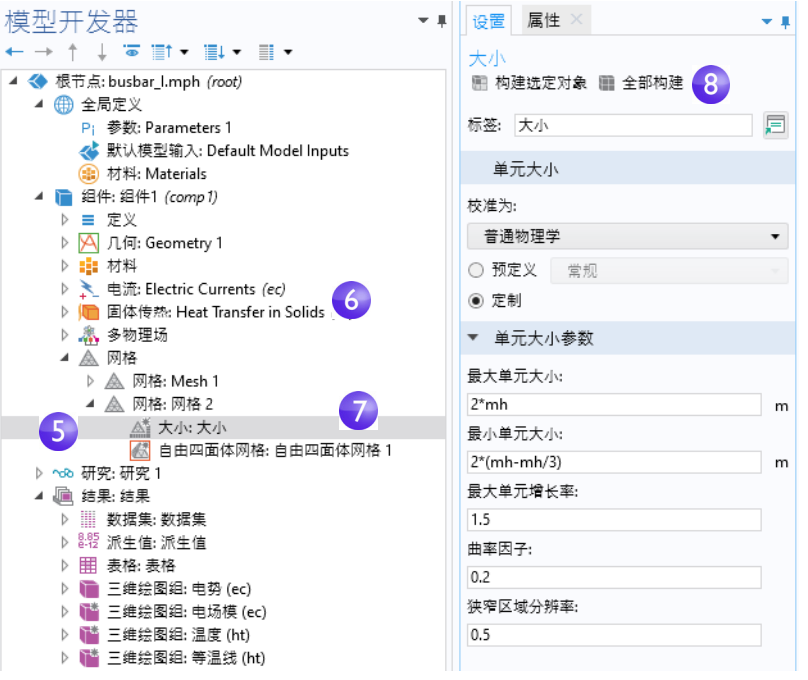


4 单击**网格 2** 节点。在**网格设置**窗口的**网格设置**栏中，选择**用户控制网格**作为**序列类型**。

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**窗口的**网格 2** 节点下，单击**大小** 。



节点图标右上角的星号 (*) 表示该节点处于编辑状态。

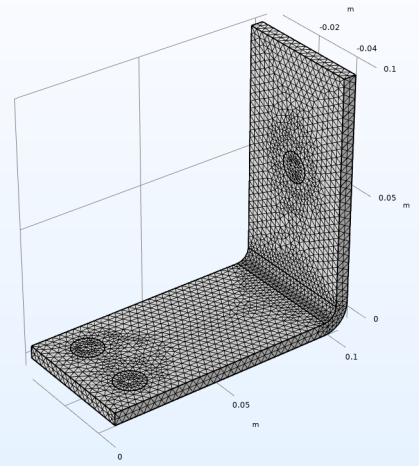
6 在**大小设置**窗口的**单元大小**栏中，单击**定制**按钮。

7 定位到**单元大小参数**栏：

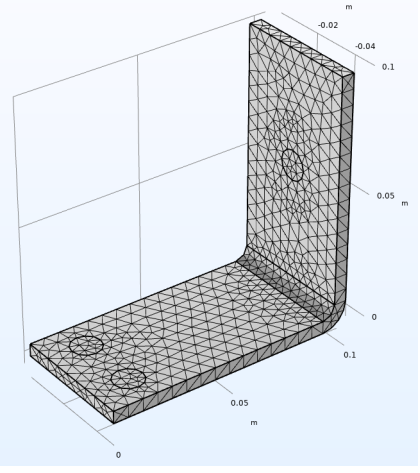
- 在**最大单元大小**框中输入 `2*mh`，其中 `mh` 为 3 mm - 先前定义的网格控制参数。
- 在**最小单元大小**框中输入 `2*(mh-mh/3)`。
- 在**曲率因子**框中输入 `0.2`。

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 77 页的 “全局定义” 章节中定义。



网格 1



网格 2

添加物理场

当您在现有模型中添加物理场时， COMSOL Multiphysics 卓越的适应性与兼容性特点会更加突出。

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

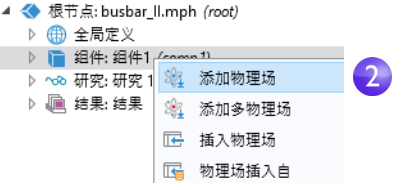
完成母线板的焦耳热仿真后，我们得知母线板会升温。那么热膨胀会产生什么样的机械应力呢？为了回答这个问题，让我们展开模型，引入与结构力学关联的物理场。

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”，可以在阅读完本节后前往第 146 页的 “添加流体流动进行冷却” 一节。

1 打开之前在第 109 页保存的模型 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。

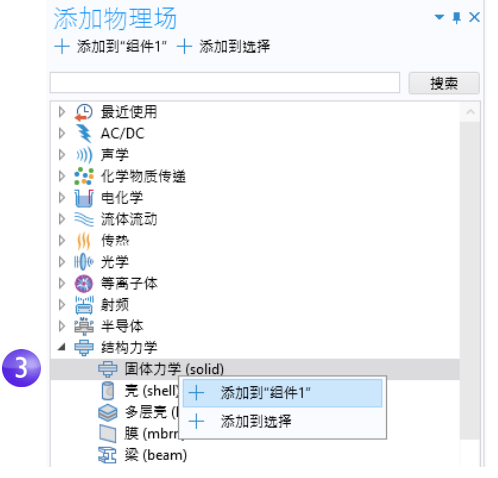
2 在**模型开发器**窗口中，右键单击**组件 1** 节点 并选择**添加物理场** 。



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，您可以右键单击并选择**添加到 “组件 1”**，或单击窗口顶部的 ＋ **添加到 “组件 1”** 按钮。也可以双击进行添加。

4 关闭**添加物理场**窗口并保存文件。



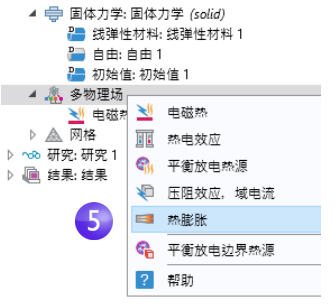
在添加其他物理场时，需确保**材料**节点中包含的材料具有所选物理场需要的所有属性。在本例中，铜和钛均已具备所需属性。

首先，您可以在结构分析中添加热膨胀效应。

5 在**模型开发器**窗口中，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。

您也可以使用功能区，从**物理场**选项卡中选择**多物理场耦合** > **热膨胀**。



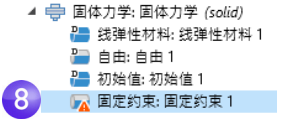
6 在**热膨胀**的**设置**窗口中，从**选择**列表中选择**所有域**。即可在铜和钛螺栓中启用热膨胀。

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**从**材料**节点中取值。在**模型输入**栏中，**体积参考温度**（应变参考温度）的默认值为 293.15 K（室温），取自**通用模型输入**，本例中对应于**全局定义**下的**默认模型输入**节点，用于定义不发生热膨胀时的温度。**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。

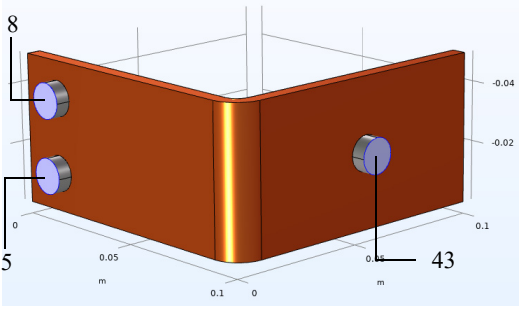
接下来，我们在钛螺栓位置对母线板施加约束。

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，旋转母线板以查看其背面。单击其中一个螺栓的圆形表面，将其添加到**选择**列表中。

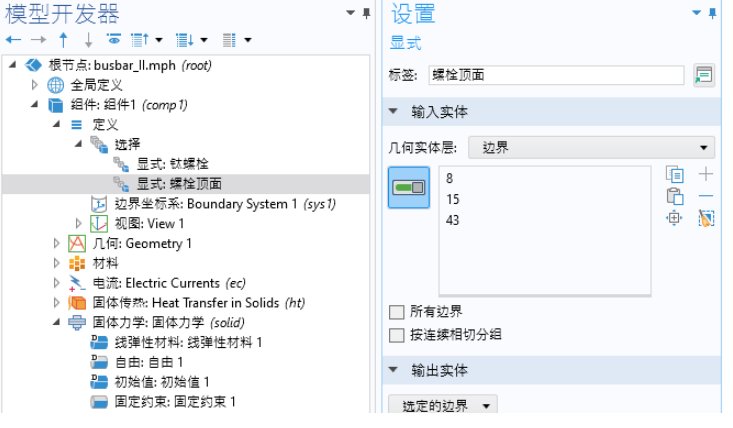


9 对其余螺栓重复此操作过程，添加边界 8、15 和 43。



为方便管理多个边界选择，您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，例如**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。您可以使用该技巧对域、边界、边和点进行分组。在下图中，已经为钛螺栓域创建了额外的选择。



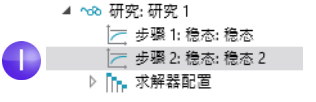
接下来，我们将结合添加的物理场来更新**研究**节点。

求解焦耳热和热膨胀

本例假设材料温度不变、变形很小，并忽略电接触压力效应，因此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。

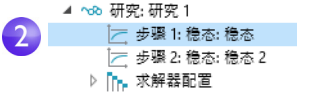
1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**研究 1** 并选择**研究步骤 > 稳态 > 稳态**，以添加另一个稳态研究步骤。



在添加研究步骤时，您需要手动连接各个物理场及其对应的正确研究步骤。我们首先禁用第一步中的结构分析。

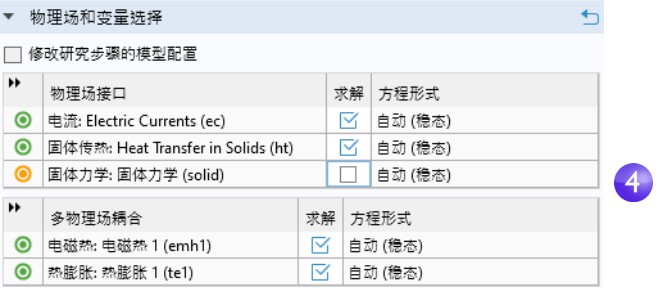
2 在**研究 1** 下，单击**步骤 1：稳态**节点。

3 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**。



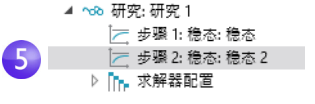
4 在**固体力学 (solid)** 行对应的**求解**列，通过单击将复选标记 ☑ 更改为 ☐，以从**研究步骤** 1 中移除**固体力学**。

在**多物理场耦合**栏中，保留所有默认设置。

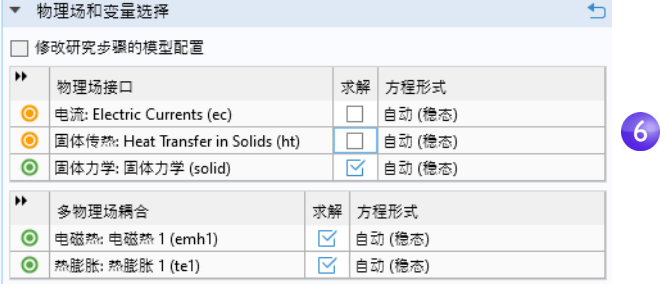


现在重复上述步骤，从第二个研究步骤中移除**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)**。

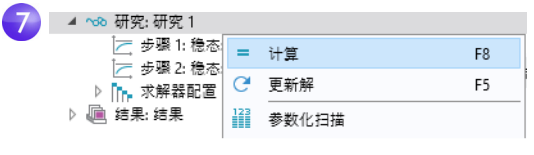
5 在**研究 1** 节点下，单击**步骤 2：稳态 2**。



6 在**物理场和变量选择**的**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)** 行，通过单击将复选标记 ☑ 更改为 ☐，以从**步骤 2：稳态 2** 中移除 “焦耳热”。



7 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**）进行求解。



将文件另存为 `busbar_II.mph`，此时其中包含**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，因此需要手动添加附加的**固体力学**绘图。首先添加位移图。

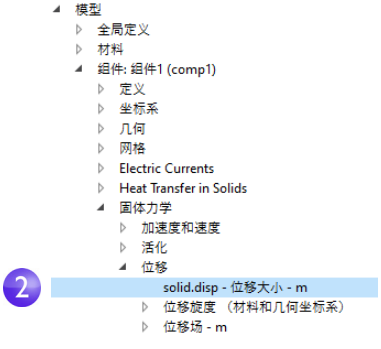
1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**结果** 并添加**三维绘图组** 。在**标签**框中输入**位移**，为绘图组提供一个描述性名称。右键单击**位移** 并添加**表面 1** 节点 。单击**表面 1** 节点 。

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 - 位移大小 - m**。

此外，您也可以在**表达式**框中输入 `solid.disp`。

现在，我们更改单位，使其更适合目前的情况。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）。

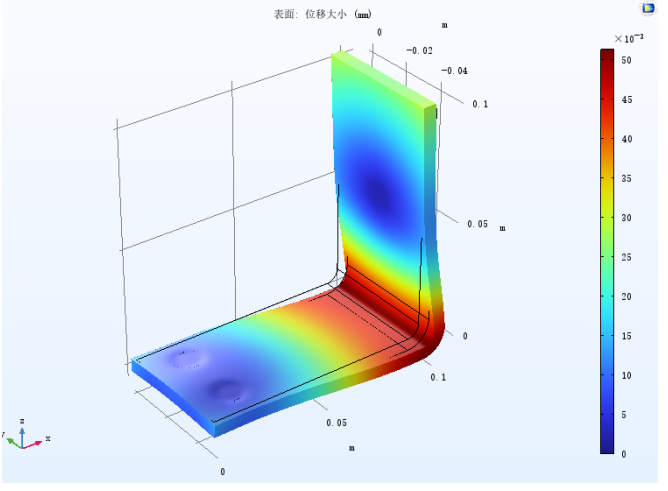


由热膨胀引起的局部位移显示为表面图。接下来，我们将添加母线板变形的相关信息。

3 在**模型开发器**窗口的**结果** > **位移**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**切换到默认视图**按钮 ，此时您的视图应与以下绘图相似。

为了使实际发生的极小扭曲更加直观，下图所示的变形被明显放大。

3



4 保存 `busbar_II.mph` 文件，此时文件包含带**变形**的**表面**图。

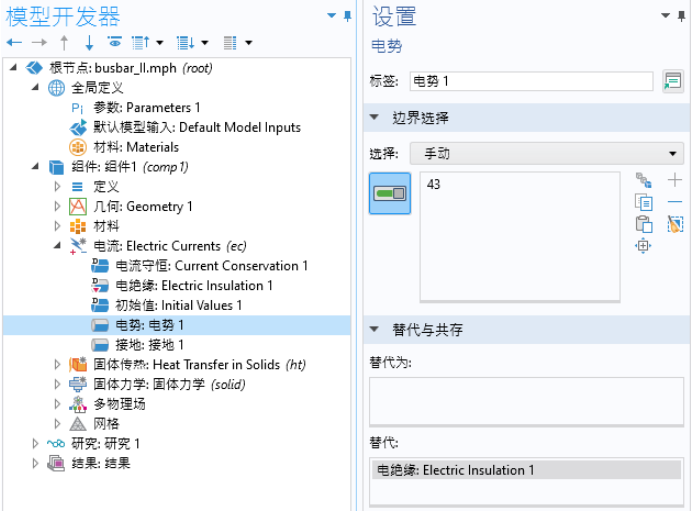
您还可以通过绘制 von Mises 应力和主应力，评估母线板和螺栓的结构完整性。

替代与共存：独占和共存节点

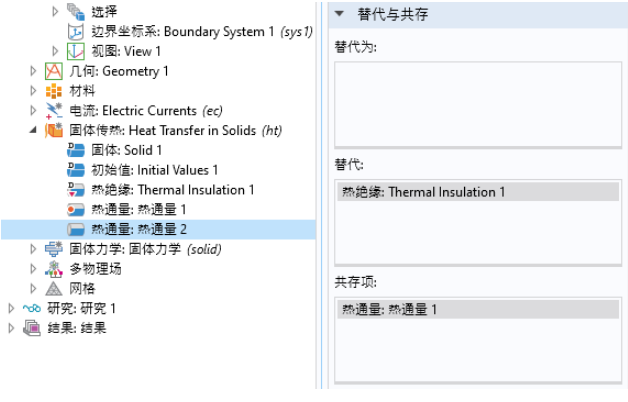
系统会从物理场接口的模型树节点顶部开始向下逐一访问这些节点。下方的节点可以完全或部分替代或遮蔽序列中较早的节点，具体取决于选择内容。物理场接口节点的类型有两种：独占和共存。节点的处理方式与其类型有关。

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**替代与共存**栏。**替代**列表说明，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）是共存节点的典型示例。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，替代与共存关系分别由红色箭头和橙色的圆来表示。

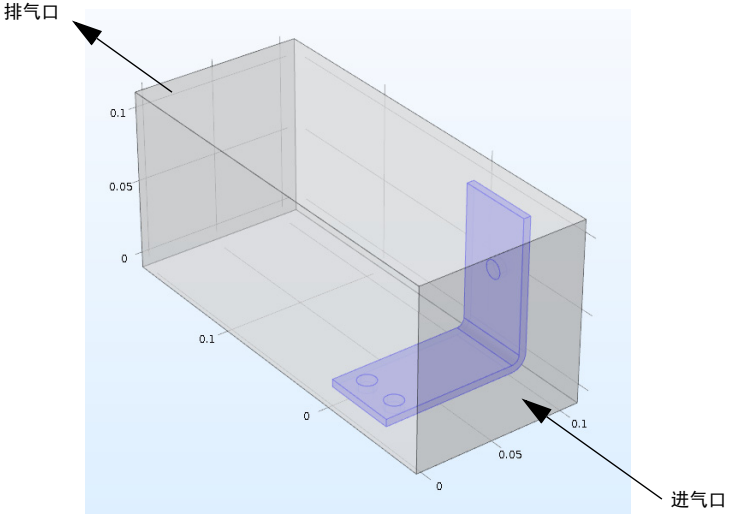
添加流体流动进行冷却

在分析母线板中生成的热量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使其冷却的方式。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。

如果您使用**非等温流动**或**共轭传热**多物理场接口，可以自动实现固体传热与流体传热之间的耦合；但在本例中，这是手动完成的，且功能有限。这是为了说明如何在现有分析中添加多物理场耦合。

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。为了模拟流动域，需要在母线板周围为外部流动创建空气框。您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。为了节省时间，您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 （如下文所述）：



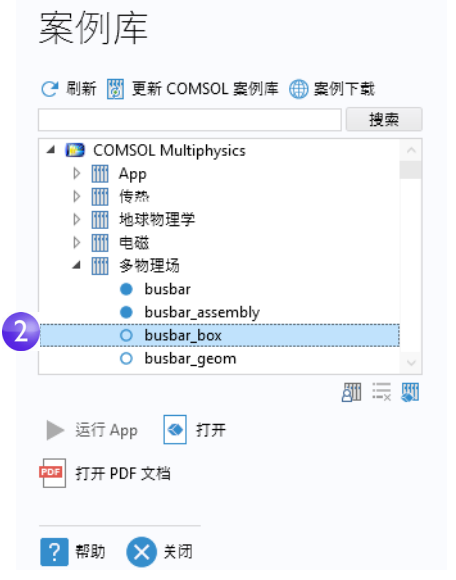
定义入口速度

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。

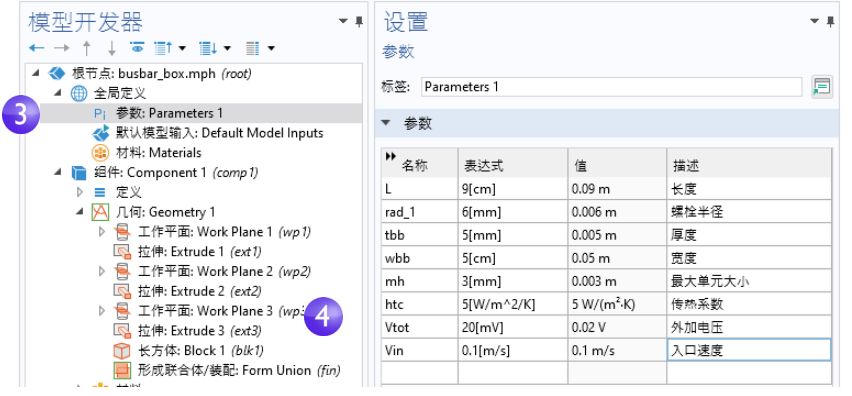
2 单击**主屏幕**选项卡，从**窗口**菜单中选择**案例库** ▥。导航至 **COMSOL Multiphysics > 多物理场 > busbar box**。（您也可以从**文件**菜单直接打开“案例库”。）

双击以打开文件，其中包含几何以及截止第 133 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 Pi 。

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 0.1[m/s]，并在**描述**列中输入选择的描述，如**入口速度**。



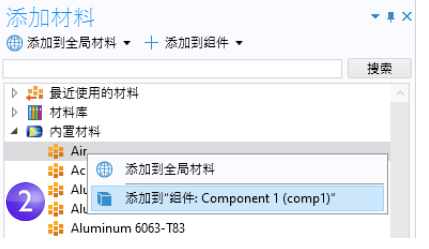
5 选择**文件** > **另存为**，并使用新名称 busbar_box_I.mph 来保存模型。

添加空气

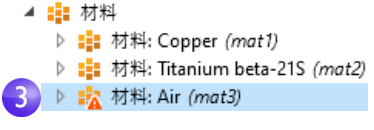
下一步是添加空气的材料属性。

1 从**主屏幕**选项卡中选择**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。

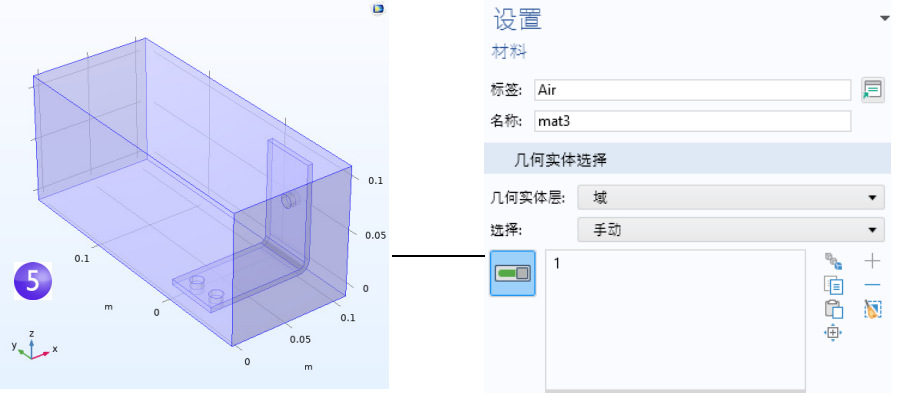


3 在**模型开发器**窗口的**材料**下，单击 **Air** 节点。



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，此时其颜色会变为蓝色。此步骤可以将空气材料属性指派给空气框。

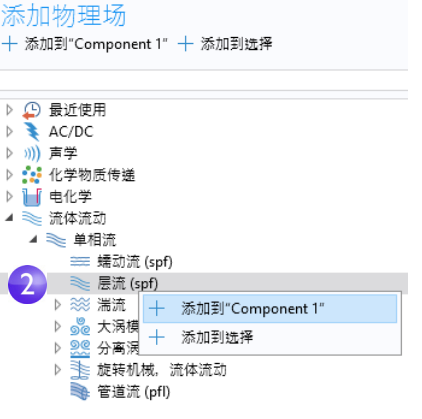


添加流体流动

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**。

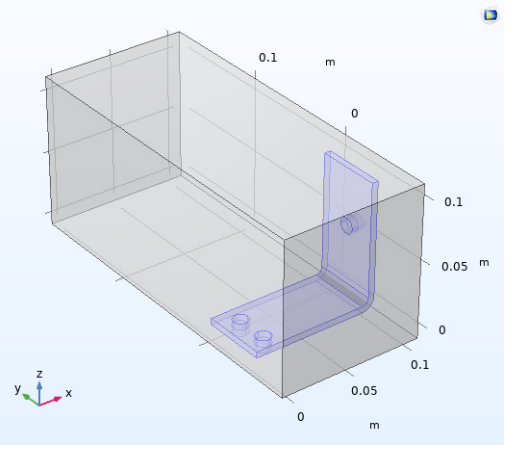
2 在**添加物理场**窗口的**流体流动 > 单相流**下，右键单击**层流** 并选择 **添加到组件**。**层流**将显示在模型树的**组件 1** 节点下。关闭**添加物理场**窗口。



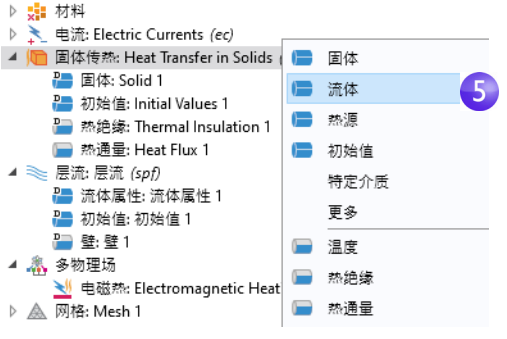
3 在**图形**工具栏中，单击**透明**按钮 。然后单击**线框渲染**按钮 。这两个设置使我们更容易查看框的内部。在建模过程中，您可以根据需要来打开或关闭这些设置，控制所用的渲染类型。

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)** 接口中移除（假设空气无导电性，因此不含电流），然后需要将**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。

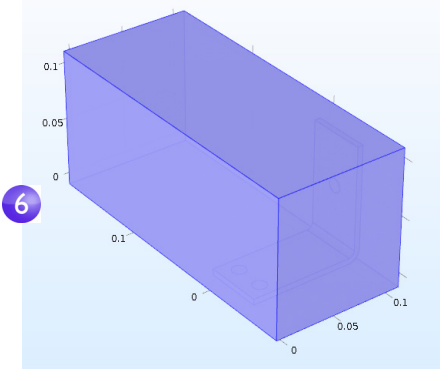


5 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体传热** 。在上下文菜单的第一栏（域层 ），选择**流体**。



6 在**图形**窗口中，单击空气域（域 1）将其添加到**选择**列表中。

现在，将流体流动与传热现象进行耦合。



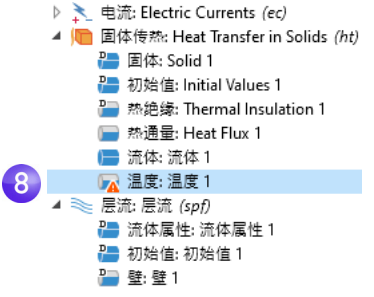
7 展开**固体传热**节点，在**流体**的**设置**窗口中定位到**模型输入**栏，并从**绝对压力**列表中选择**绝对压力 (spf)**。在**热对流**栏中，从**速度场**列表中选择**速度场 (spf)**。

此操作可以确定**层流**接口的压力和流场，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**窗口中，右键单击**固体传热**。在上下文菜单的第二栏（边界栏）中选择**温度**。

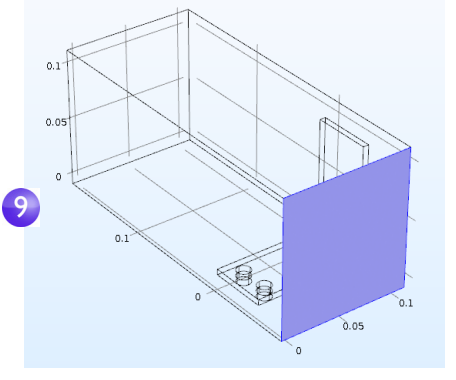
温度节点会添加到模型树中。



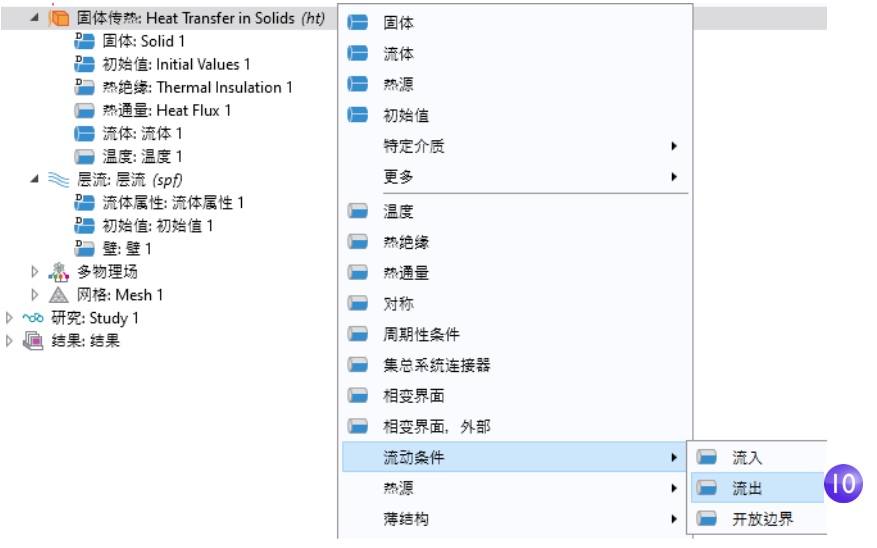
9 在**图形**窗口中，单击入口边界（边界编号 2），将其添加到**选择**列表中。

此操作可以将入口温度设为默认设置 293.15 K。

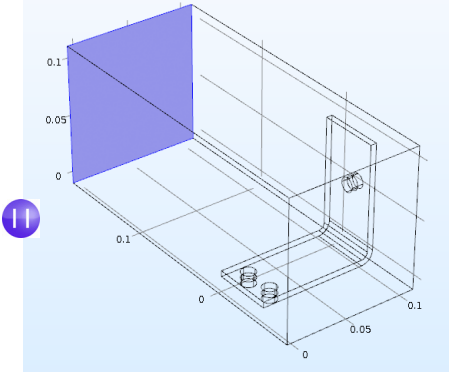
此时图形应如右图所示。（根据您是否打开**透明**和**线框渲染**，显示可能会略有差异。）接下来，继续定义出口。



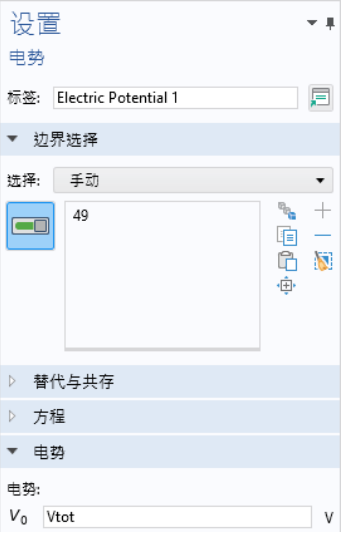
10 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体传热**。在边界层，选择**流动条件** > **流出**。**流出**节点 会添加到模型树中。



11 在**图形**窗口中，单击出口边界（边界编号 5），将其添加到**选择**列表中。使用鼠标滚轮进行滚动，并在选择边界之前将其突出显示，或使用向上和向下箭头键盘按键。

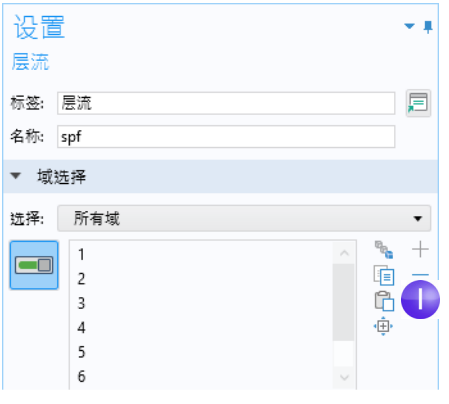


即使为空气域添加了框几何，母线板、螺栓、**电势 1** 和**接地 1** 边界的设置也都保留了正确的选择。为了证实这一点，您可以在模型树的**电流**节点下单击**电势 1** 和**接地 1** 节点，确认其边界选择正确。



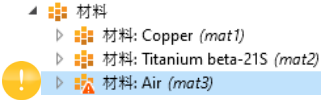
接下来继续设置流动属性。您需要指明流体流动仅发生在流体域中，然后设置入口、出口和对称条件。为此，首先从选择中移除所有域，然后添加空气域。

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。



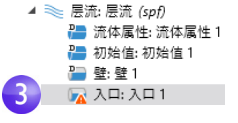
2 在**图形**窗口中，单击空气框 （域 1）将其添加到**选择**中。

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**栏中，确认不缺少任何属性，即没有带警告符号 ⚠ 的项。请参见第 84 页的 “材料” 章节，以了解更多信息。

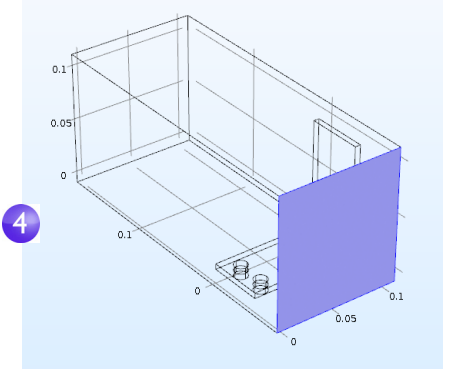


接下来，继续操作边界。

3 在**模型开发器**窗口中，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。

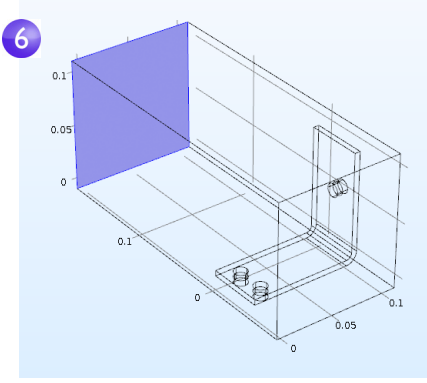


4 在**图形**窗口中，单击入口 （边界 2）将其添加到**选择**列表中。



5 定位到**入口**的**设置**窗口，在**速度**栏的 U_0 框中，输入 `Vin` 以设置**法向流入速度**。

6 右键单击**层流**，并在边界栏中选择**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。使用鼠标滚轮或键盘上的箭头键进行滚动，并在选择边界之前将其突出显示。

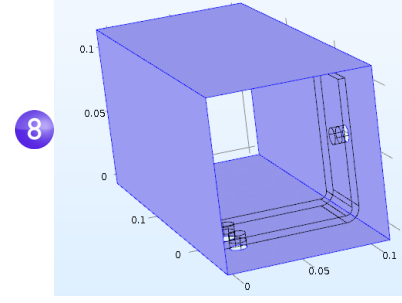


最后一步是添加对称边界。为方便起见，假设空气在通道各个面外的流动情况与这些面内的流动类似，这可以通过对称条件来正确表示。

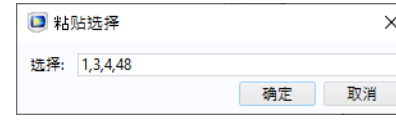
7 右键单击**层流**并选择**对称**。**对称**节点会添加到序列中。

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，此时其中包含 **Air** 材料和**层流**接口设置。



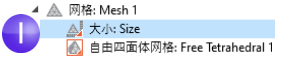
如果已知边界编号，则可以单击**粘贴选择**按钮并输入该信息。对于本例，在**粘贴选择**窗口中输入 1,3,4,48。单击**确定**，这些边界会自动添加到**选择**列表中。



粗化网格

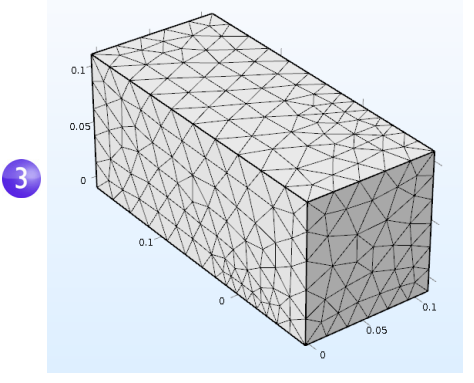
为了快速求解，我们将稍微改变网格，使其更粗糙一些。当前的网格设置需要相对较长的时间进行求解，稍后您可以随时细化网格。

1 在**模型开发器**窗口中展开**网格 1** 节点，并单击**大小**节点。



2 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**。

3 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**设置才能看到如下所示的图）。



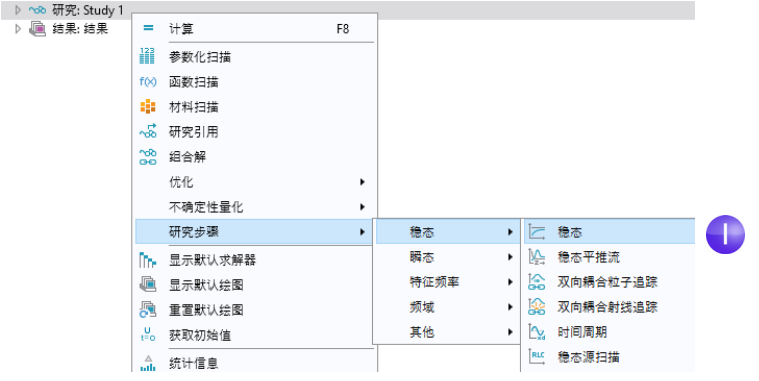
您可以假设流速足够大，从而可以忽略流场中温度升高的影响。

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。本节描述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**模型开发器**窗口中。

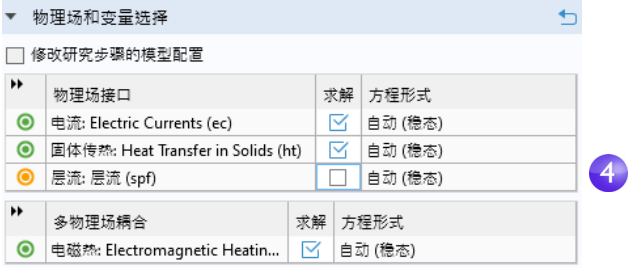


接下来，需要将正确的物理场连接至对应的研究步骤。首先禁用与第一步中的焦耳热关联的**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)** 接口。

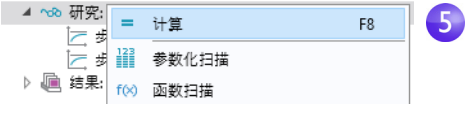
2 在**研究 1** 节点下，单击**步骤 1：稳态**。

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** 节点下，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 改为 。

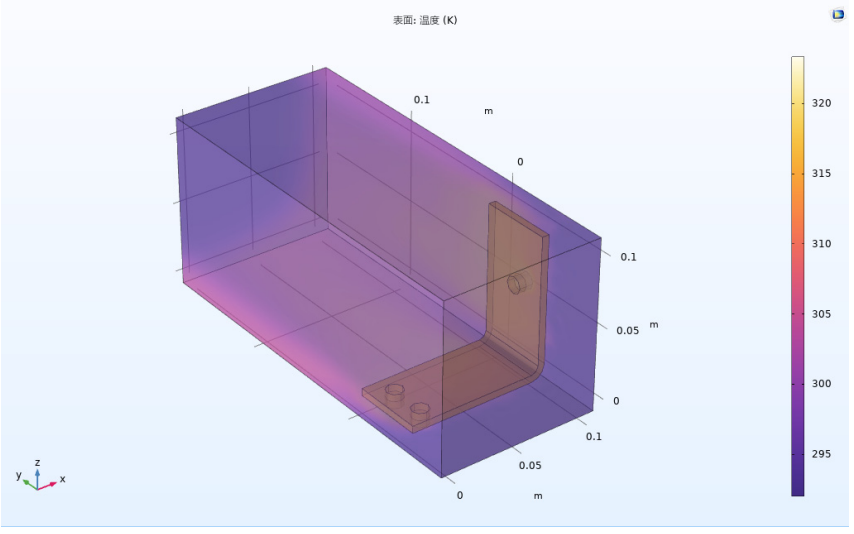


5 右键单击**研究 1** 节点 ，并选择**计算** （也可以按 F8 或单击功能区中的**计算**）。现在，软件将自动创建新的求解器序列，并依次对层流和焦耳热进行求解。



6 求解完成后，在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，选择**温度 (ht)** 图。如果尚未打开透明效果，可以单击**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，您可以单击中键并按住鼠标按键 （或滚轮），同时拖动鼠标。

6



图形窗口中显示的**温度表面**图呈现了母线板和周围框中的温度。我们还可以看到，由于网格相对粗糙，温度场并不平滑。要得到更平滑的解，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。

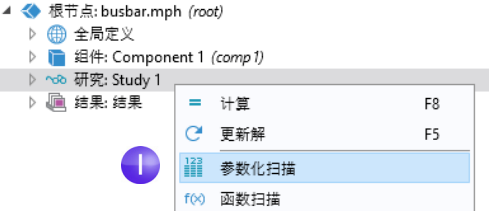
参数化扫描

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形状，因此改变宽度 wbb 会改变电流密度，这反过来又会影响工作温度。我们对 wbb 运行参数化扫描来研究这种变化。

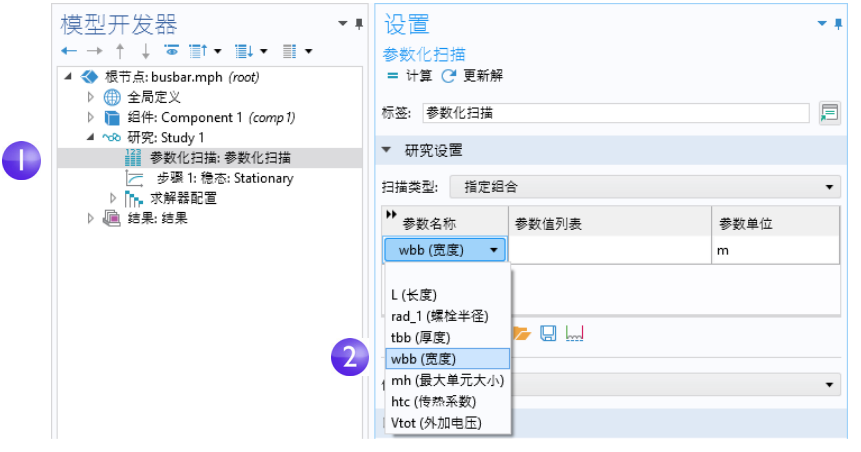
添加参数化扫描

1 从**文件**菜单中打开模型文件 busbar.mph。如果您未保存该模型，也可以从“案例库”中将其打开：**文件 > 案例库 > COMSOL Multiphysics > 多物理场 > busbar**。

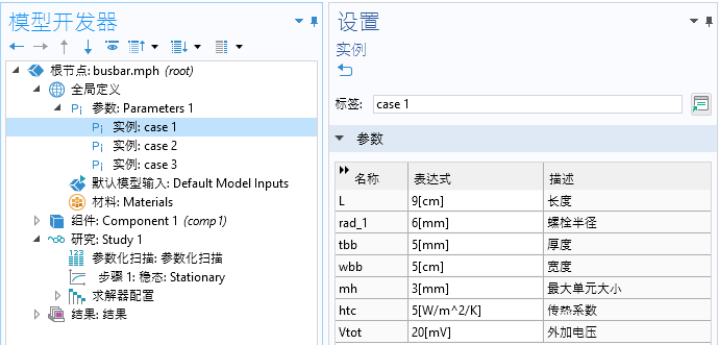


在**模型开发器**窗口中，右键单击**研究 1** 并选择**参数化扫描** 。**参数化扫描**节点将添加到**模型开发器**序列中。

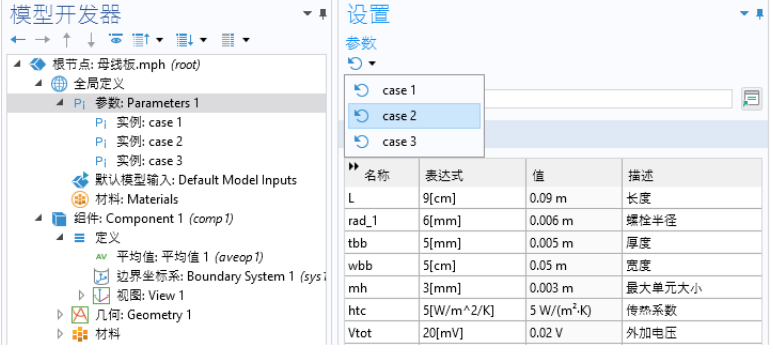
2 在**参数化扫描设置**窗口的空参数表下，单击**添加**按钮 ＋。从表格的**参数名称**列表中选择 wbb。



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**、**指定组合**的子集，还是扫描**参数 switch**，后者可用于扫描**全局定义**中定义的**参数**的**实例**（如下所示）。

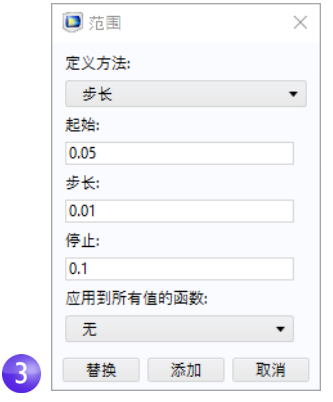


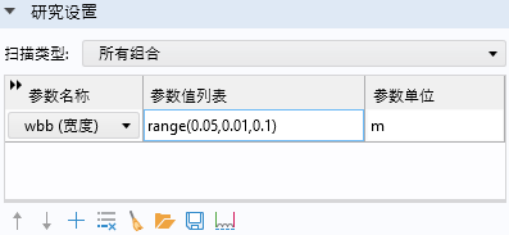
请注意，您可以通过从**参数**窗口左上角的菜单中进行选择，将模型中使用的主要**参数**集替换为**实例**的参数。



3 输入一个参数值范围，以 1 cm 的增量对母线板宽度从 5 cm 到 10 cm 进行扫描。您可以通过不同的方式输入此信息：

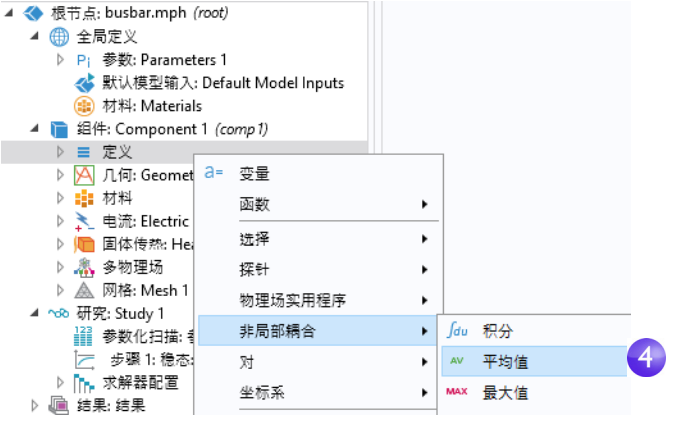
- 在**参数值列表**框中复制并粘贴，或输入 `range(0.05,0.01,0.1)`。
- 单击**参数值列表**框，然后单击**范围** 按钮，并在**范围**对话框中输入值。在**起始**框中输入 `0.05`。在**步长**框中输入 `0.01`，并在**停止**框中输入 `0.1`。单击**替换**。
- 此外，对于任一种方法，您都可以使用长度单位来替代使用 m 的默认 SI 单位制。您可以输入 `5[cm]` 来代替 `0.05`；同样，可以用 `1[cm]` 代替 `0.01`，并用 `10[cm]` 代替 `0.1`。不仅如此，还可以在模型树根节点的**设置**窗口中更改默认的单位制。



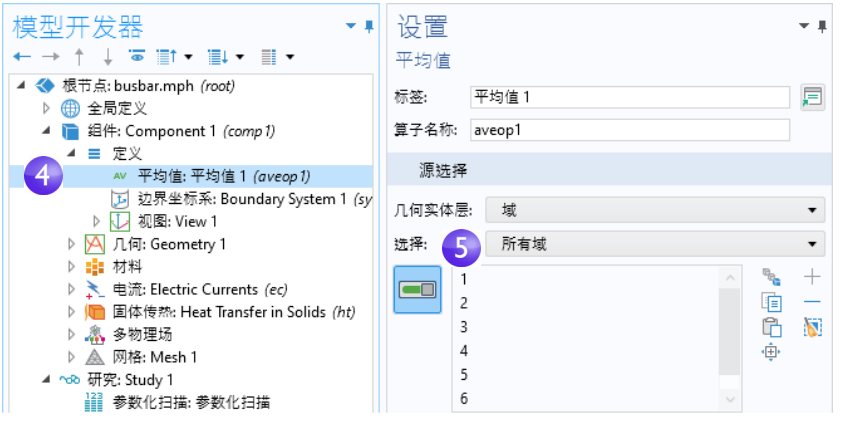


接下来，我们定义一个**平均值**非局部耦合，稍后可用于计算母线板中的平均温度。

4 在**组件 1** 下，右键单击**定义** ≡ 并选择**非局部耦合 > 平均值** AV 。



5 在**平均值**的**设置**窗口中，从**选择**列表中选择**所有域**。



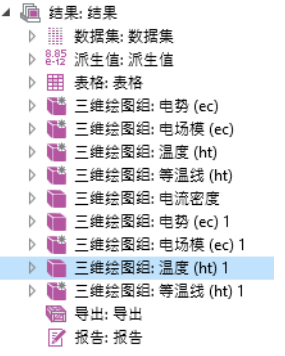
此时会创建一个名为 aveop1 的算子，可用于计算在所选域上定义的任何物理量的平均值。稍后，我们将使用此工具来计算平均温度，也可以计算平均电势、电流密度等。

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

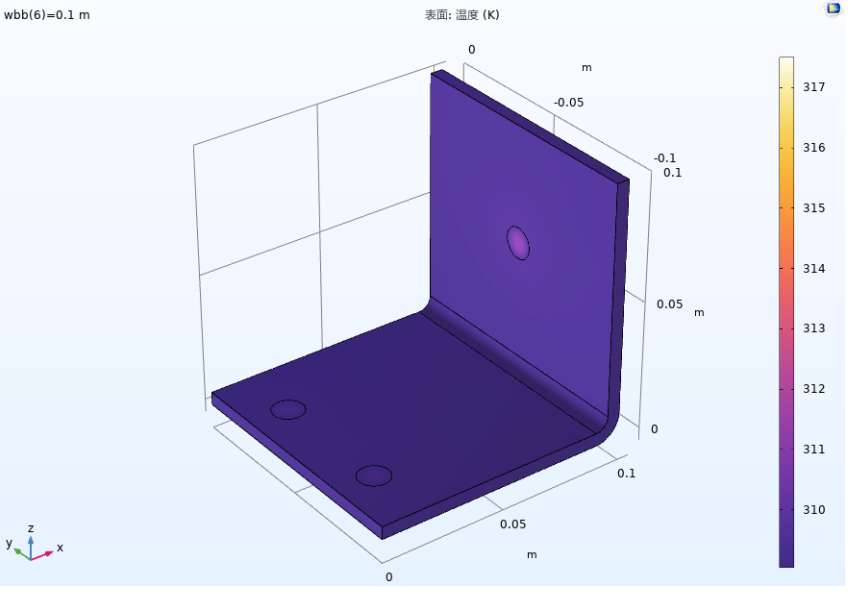
7 要运行扫描，右键单击**研究 1** 并选择**计算** ＝，或在**主屏幕**选项卡中单击**计算**。

参数化扫描结果

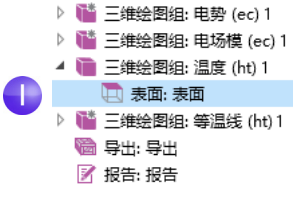
在模型树的**结果**下单击**温度 (ht) 1** 节点 （第二个温度图节点）。



图形窗口中显示的绘图展示了使用最后一个参数值 wbb=0.1[m] (10[cm]) 的较宽母线板中的温度。选择**图形**窗口工具栏中的**缩放到窗口大小** 以查看整个绘图。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。

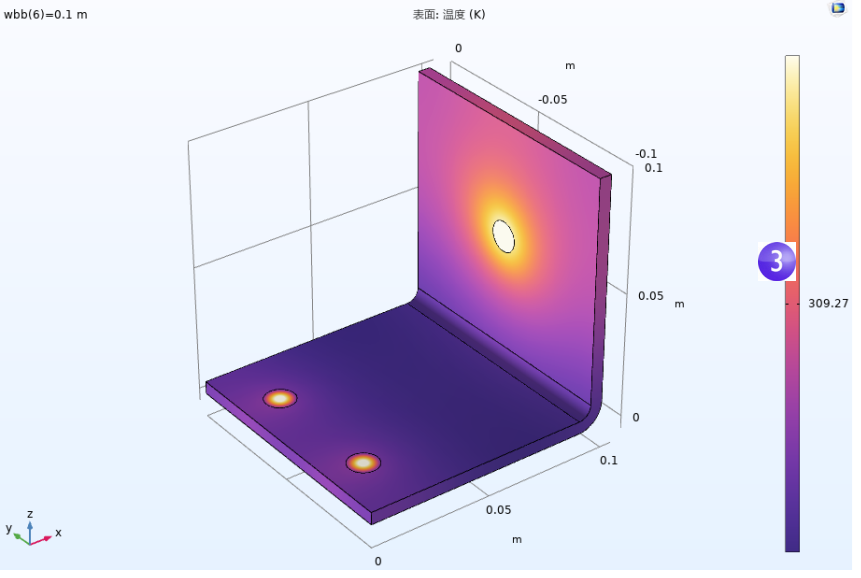


1 在**温度 (ht) 1** 节点下，单击**表面**节点 。



2 在**表面**的**设置**窗口中，单击**范围**以展开该栏。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**窗口中对应于 wbb=0.1[m] (10[cm]) 的**温度 (ht) 1** 图会更新。



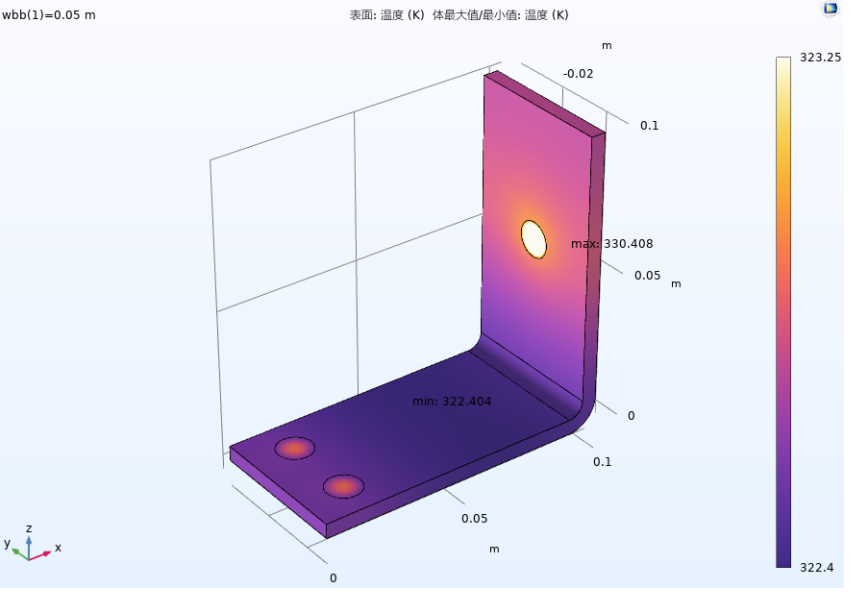
绘图根据您运行的版本可能会略有不同。将这一宽母线板图与 wbb=0.05[m] (5[cm]) 时的温度图进行比较。为此，您可以重用之前定义的一个绘图组。

1 在**模型开发器**窗口中，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结果。

3 在**参数值**列表中，选择 **0.05**（表示 wbb=5 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 。

wbb=0.05[m] (5[cm]) 对应的**温度 (ht)** 图会更新。请注意，如果您已更新该绘图的颜色范围，则绘图应如下所示。否则，请按照以下后续步骤进行操作。



（绘图可能包含最大值和最小值，具体取决于您开始使用的模型版本。）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**以展开该栏（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）。

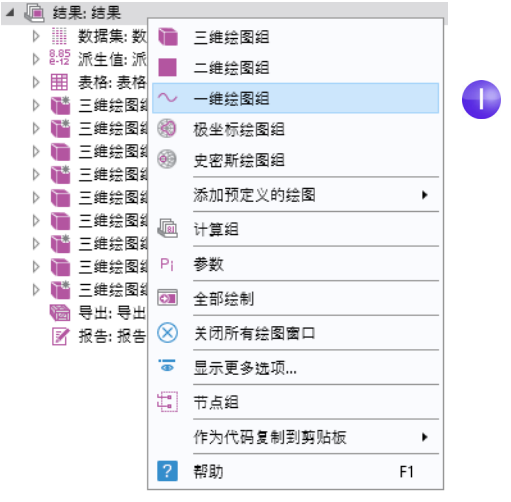
图形窗口中对应于 wbb=0.05[m] (5[cm]) 的**温度 (ht)** 图会更新。

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。

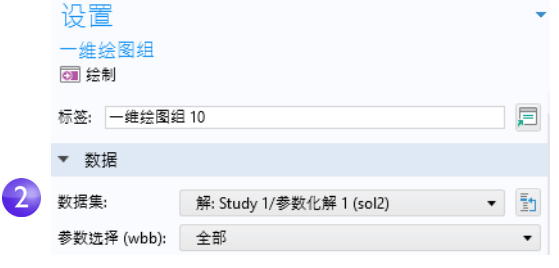
添加更多绘图

要进一步分析这些结果，可以绘制每个宽度的平均温度。

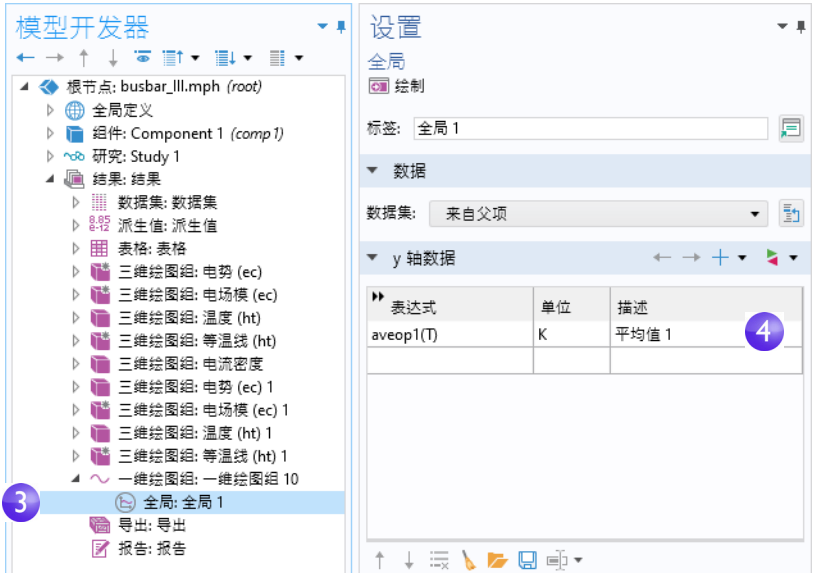
1 右键单击**结果** 并添加**一维绘图组** 。



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** 。

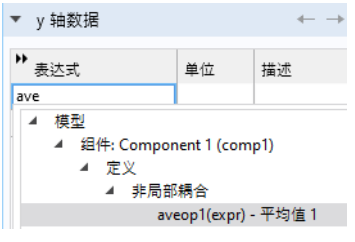


3 在**模型开发器**窗口中，右键单击**一维绘图组**并添加**全局** 节点。

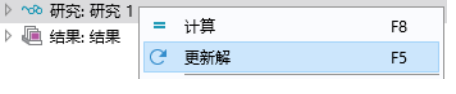


4 在**全局设置**窗口的 **y 轴数据**栏下，单击**表达式**列中的第一行，然后输入 aveop1(T)。该算子是在第 163 页中定义的，可供后续使用。您可以使用类似语法来计算其他量的平均值。

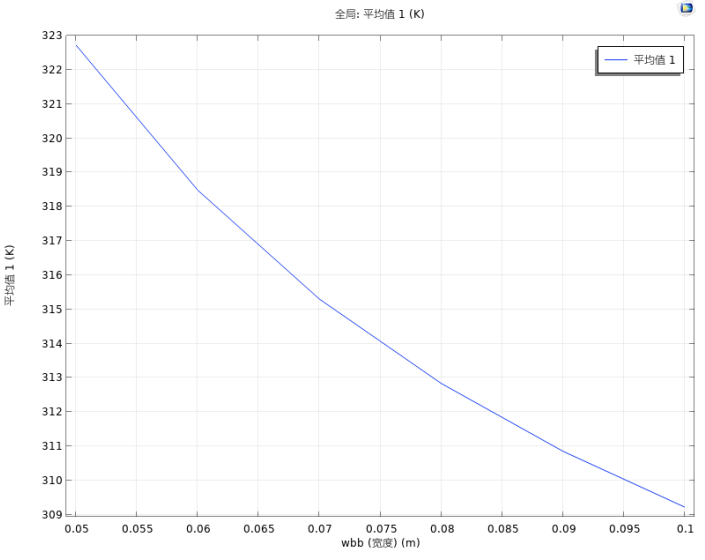
您也可以在单击第一行或键入几个字符后使用 Ctrl+/ 来自动完成。



要在不求解的情况下使用非局部耦合算子，您可以通过右键单击**研究**节点来选择可用的**更新解**选项。



5 单击**绘制**按钮 ，并保存包含这些附加绘图（使用参数化扫描结果）的 busbar_III.mph 模型。

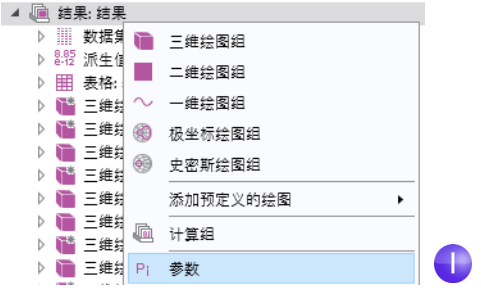


在该绘图中，平均温度会随宽度的增加而降低。

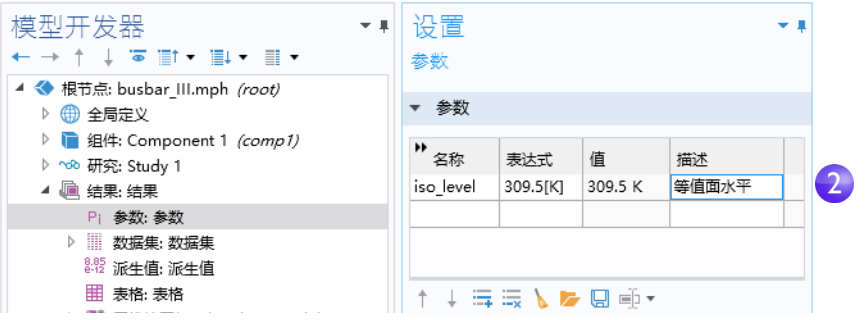
结果中的参数

为了实现更大的灵活性，您可以定义仅在**结果**节点中使用的参数，并且在使用这些参数时无需解析模型。以下示例演示如何对**结果**节点下定义的**参数**进行动画播放。

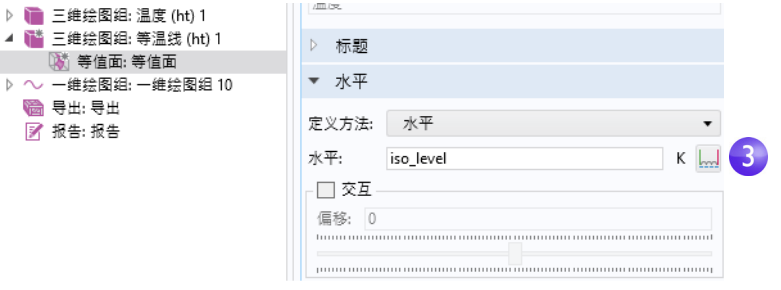
1 右键单击**结果**节点并选择**参数**。



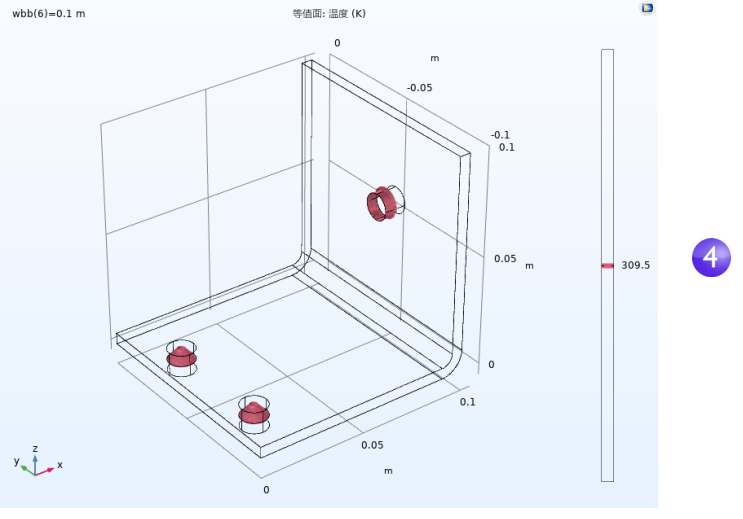
2 定义一个参数 iso_level，其**表达式**为 309.5[K]。



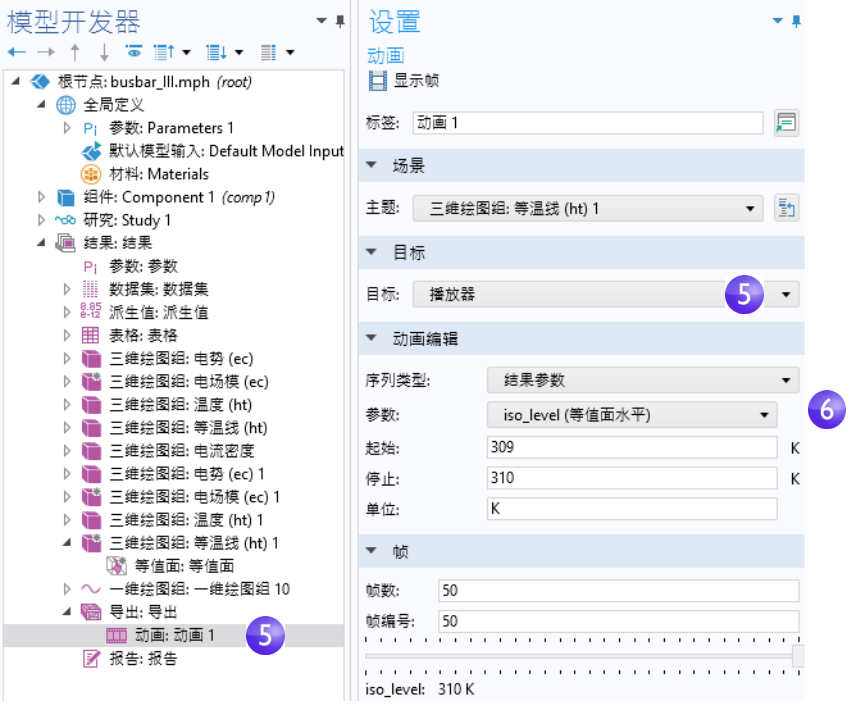
3 对于**等温线 (ht) 1** 绘图组，在**等值面**图的**设置**窗口中，将**定义方法**改为**水平**。在**水平**表达式栏中键入 iso_level。



4 在同一**设置**窗口中，单击**绘制**。



5 通过在功能区中选择**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。为了获取更平滑的动画，您可以增加**帧数**，例如将其改为 50。

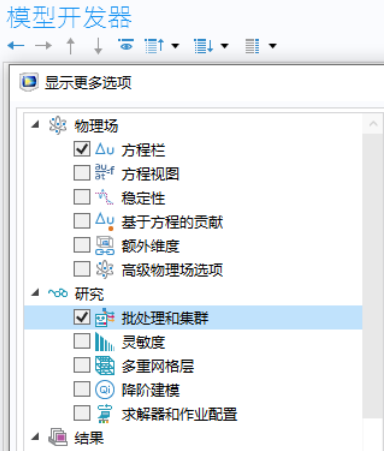
参数化扫描这一主题引出了并行计算问题；如果能同时求解所有参数，则可以极大提高计算效率。

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

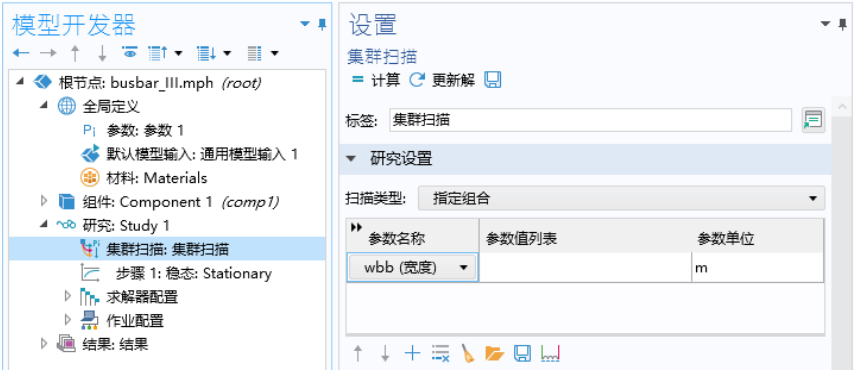
COMSOL 许可证均支持多核计算。对于集群计算或云计算 （包括并行扫描），则需要 “网络浮动许可证” (FNL)。

您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，首先需要启用**批处理和集群**研究选项，方法是单击**模型开发器**工具栏中的**显示更多选项**按钮 ，并在**显示更多选项**对话框中选中**批处理和集群**。



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。



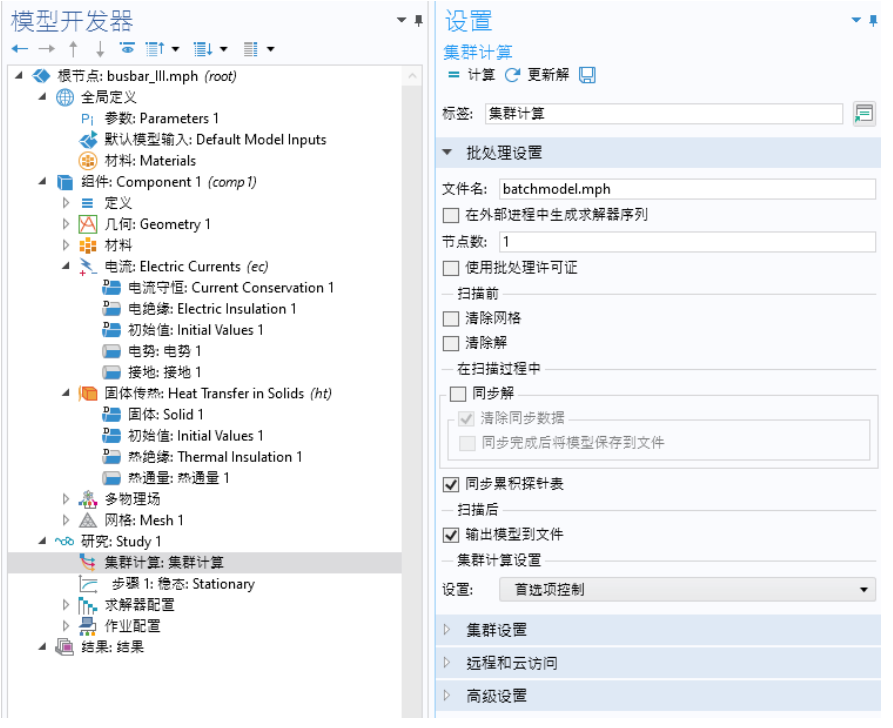
集群扫描的**研究设置**类似于**参数化扫描**，但还需要一些额外设置才能使用集群或云计算。上图显示了与 第 159 页的 “参数化扫描”中定义的扫描相同时，**集群扫描设置**窗口顶部的显示情况。为了在本例中添加并运行**集群扫描**，首先需要移除**参数化扫描**节点。

集群计算

您也可以利用集群或云计算，使用分布式内存来求解单个大模型。为了实现最佳性能， COMSOL 软件集群的实现可以结合消息传递接口 (MPI) 共享内存模型，利用每个节点上的共享内存多核处理功能。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。

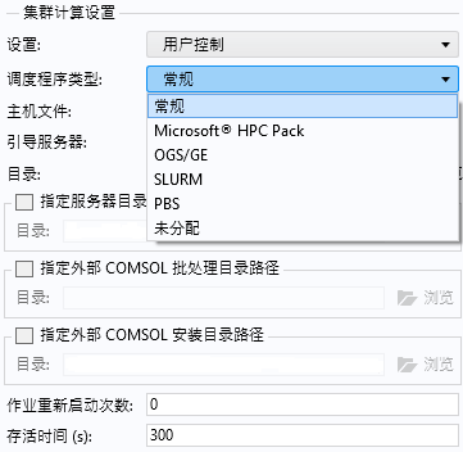
右键单击**研究**节点以添加**集群计算**节点。**集群计算**节点不能与**集群扫描**结合使用，软件将提示您是否在继续操作之前先移除**集群扫描**，选择**是**。

集群计算的**设置**窗口 （如下所示）可以帮助您通过集群或云设置来管理仿真。



集群计算设置栏的**设置**菜单包含两个选项：**首选项控制**或**用户控制**。上图显示**首选项控制**选项。对于**首选项控制**选项，相关设置在**文件**菜单的**首选项**对话框中定义。

对于**用户控制**选项，您可以从**调度程序类型**列表中选择想要执行的集群作业的类型。



COMSOL Multiphysics 和 COMSOL Server 支持“常规”、Windows® HPC Pack、Open Grid Scheduler/ Grid Engine (OGS/GE)、SLURM、PBS 或“未分配”。**常规**选项是 Linux® 集群的多用途选项。**前置命令**和**后置命令**等其他集群和调度程序设置通过**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*。

仅当您拥有网络浮动许可证并启用**批处理和集群**研究选项时，才可以使用**集群扫描**和**集群计算**选项。

COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器

通过 “网络浮动许可证”使用 COMSOL Multiphysics 时，您可以使用客户端 - 服务器操作模式来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。此操作模式不应与使用 Windows® 远程桌面和类似技术连接到 COMSOL Multiphysics 会话相混淆；也不应与 COMSOL Server 产品与 COMSOL App 结合使用的情况相混淆。

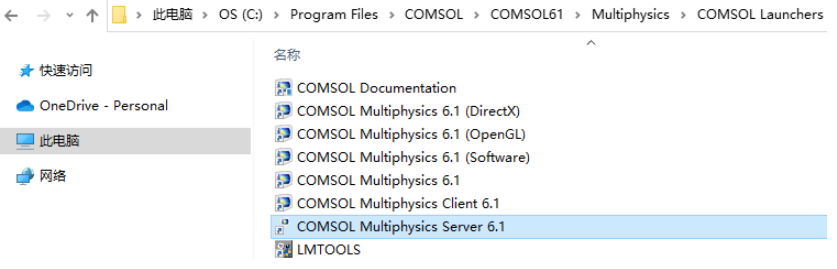
使用 COMSOL Multiphysics 客户端 - 服务器模式具有明显的优势，因为工程和科学计算问题需要处理大量的数据 - 在仿真过程中，通常会生成兆字节到千兆字节的数据。要生成并存储这些数据，建议您使用的计算机配备快速处理器、大

容量的内存 (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。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，您都可以通过客户端 - 服务器操作模式连接到远程计算资源。此过程包含两个步骤。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。

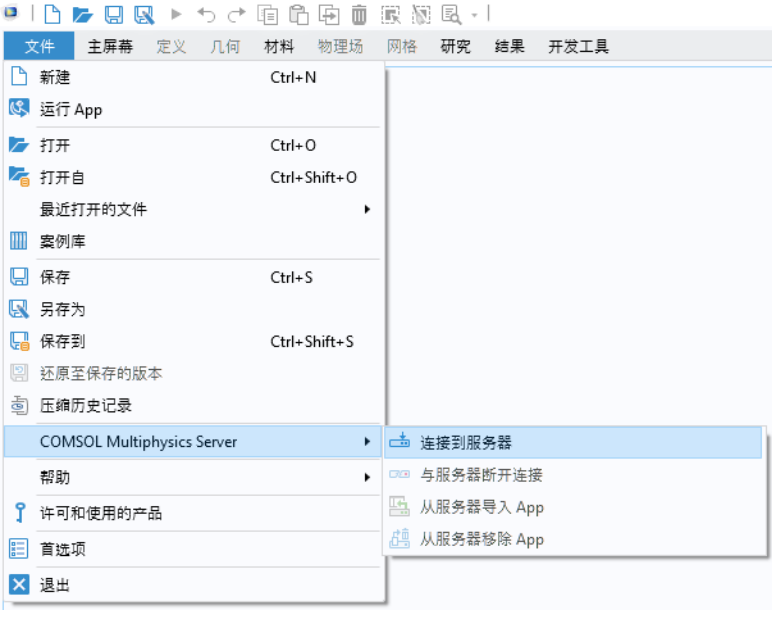
启动 COMSOL Multiphysics 服务器会话的方式有多种。在 Windows® 10 中，可以通过 Windows 开始菜单中的 **COMSOL Launchers** 选项来启动服务器会话。



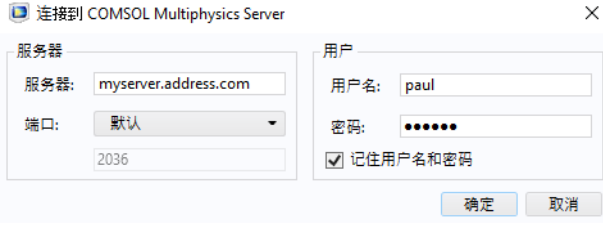
在 Linux® 中，可以使用 `comsol mphserver` 命令。服务器和客户端会话可以在不同的操作系统上运行。例如，服务器可以在 Linux® 中运行，而客户端会话则可以在 Windows® 中运行。

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，并将自动存储以供将来连接。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。您可以从**文件**菜单中选择 **COMSOL Multiphysics Server > 连接到服务器**以进行连接。



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*。

使用模型管理器

本节简要介绍如何使用 “模型管理器” 进行仿真数据管理。“模型管理器” 允许用户相互协作和集中管理模型与 App，其中提供多种工具用于版本控制、高效存储、搜索 MPH 文件内容等。您可以将数据库存储在本地计算机上供个人使用；或者，如果您拥有 “网络浮动许可证”，也可以从服务器远程访问数据库，以供与他人协同使用。您将学习如何创建本地 “模型管理器” 数据库、存储仿真数据，以及如何控制版本。

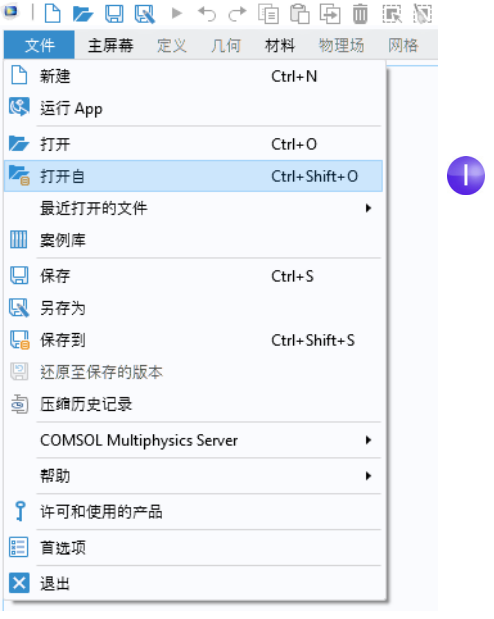
有关使用“模型管理器”的详细信息，请参阅 *Model Manager Reference Manual* 一书。

创建本地数据库

假设您尚未创建本地数据库，可以根据本节的操作步骤进行创建，以便开始使用 “模型管理器”。

在**文件**菜单中，您可以使用**打开**和**另存为**菜单项来打开本地或共享文件系统中的文件，或将文件保存到其中。此外，您还可以使用**打开自**和**保存到**菜单项在 “模型管理器” 数据库中实现文件的打开和保存操作。

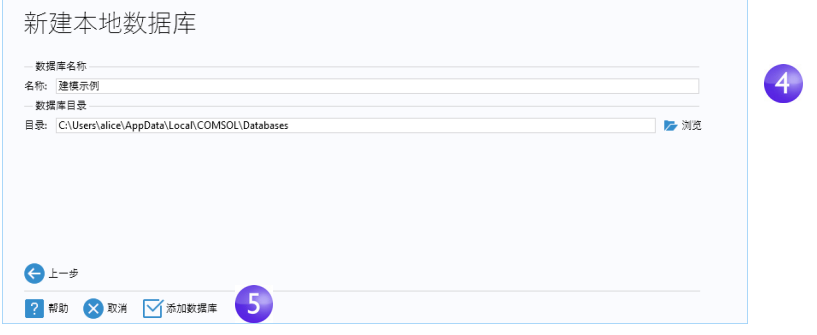
1 从**文件**菜单中选择 **打开自**。



2 在**打开**窗口的选项列表中，选择 **添加数据库**。

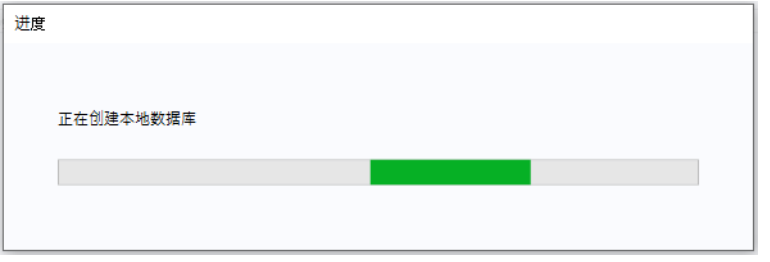
3 在**添加数据库**窗口中，选择**新建本地数据库** 。

4 在**新建本地数据库**窗口中，在**名称**框中键入**建模示例**作为新数据库的名称。如果您打算继续使用该数据库，可以选择一个更合适的名称。

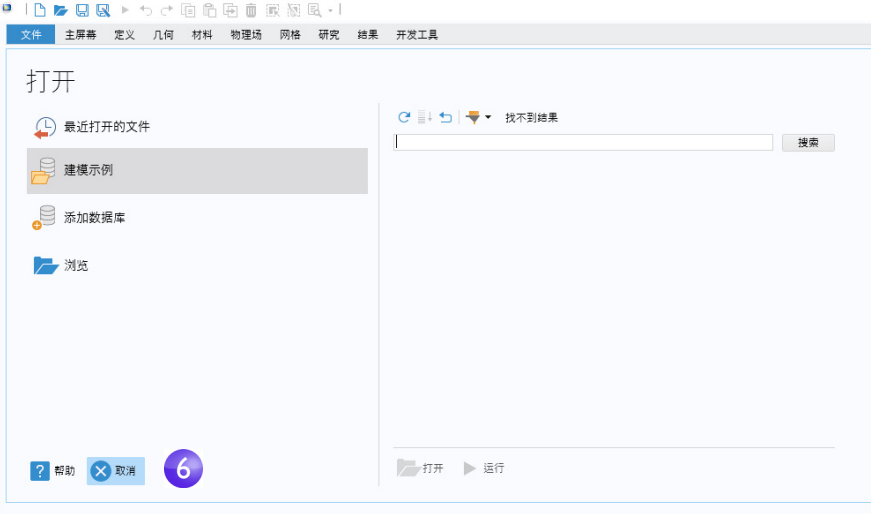


5 单击 **添加数据库**。

此时会显示一个进度窗口，通知您正在文件系统中创建数据库。



此操作完成后，会显示**打开**窗口，其中新创建的数据库在列表中处于选定状态。



6 您可以在**打开**窗口的数据库中搜索要打开的模型。此时，您的数据库是空的。单击 ⊗ **取消**。

版本控制

模型向导设置

为了演示如何使用“模型管理器”，我们将回到扳手模型（第 38 页的“示例 1：扳手结构分析”），从**模型向导**重新开始操作。

1 从**文件**菜单中选择**新建**。在**新建**窗口中选择**模型向导**。

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**。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**。

保存第一个版本

通过将新模型保存到数据库中，将其置于版本控制之下。

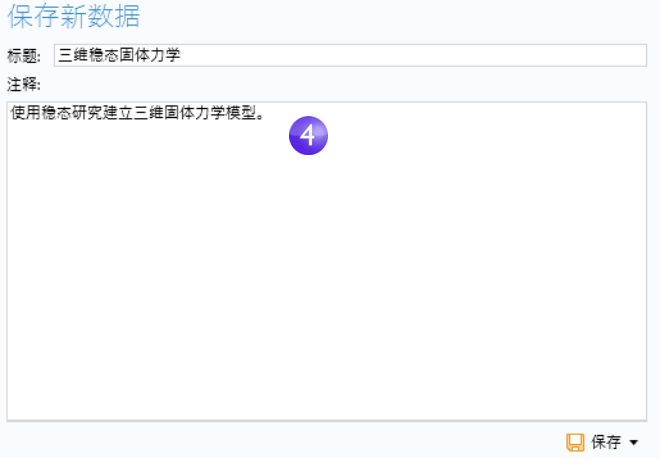
1 从**文件**菜单中选择 **保存到**。

2 在**保存**窗口中，从选项列表中选择新创建的**建模示例**数据库。

保存窗口会更新，将选定的数据库设为保存目标。由于该模型尚未出现在数据库中，因此标题为**保存新的**。

3 在空的**标题**框中键入三维稳态固体力学。

4 您可以在**注释**框中键入可选的注释，用于描述您要保存的内容。键入使用稳态研究建立三维固体力学模型。



5 单击**保存**按钮 ( )。

现在，模型的第一个版本就保存到**建模示例**数据库中了。

单击**模型开发器**窗口中的根节点。**设置**窗口的**演示**栏中的**标题**框已更新为您在保存时提供的标题。

保存其他版本

本模型使用之前创建的以 COMSOL 原生 CAD 格式 `mphbin` 存储的几何。

1 在 “模型开发器” 窗口中，右键单击**几何 1** 并选择**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 applications 文件夹中找到 `wrench.mphbin` 文件。在 Windows® 系统中，默认位置为：

```
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL61\Multiphysics\applications\
COMSOL_Multiphysics\Structural_Mechanics\wrench.mphbin
```

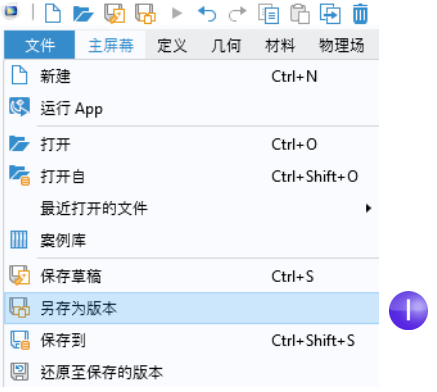
双击进行添加，或单击**打开**。

4 单击**导入** 以在**图形**窗口中显示几何。

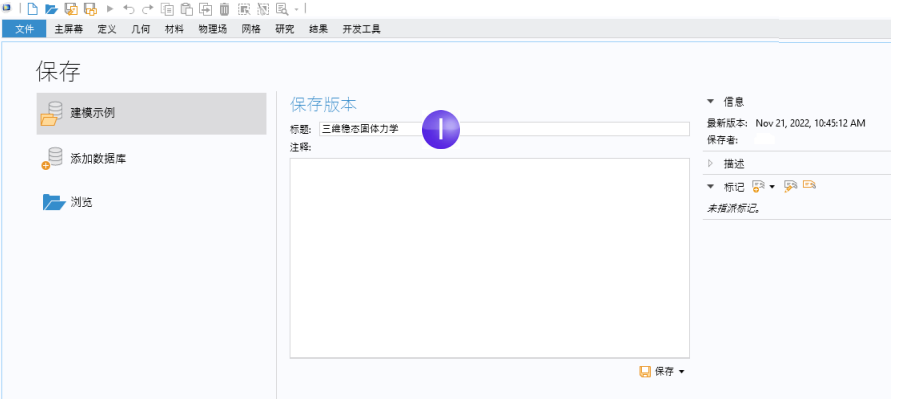
5 选择**几何 1** 并在**设置**窗口中单击**全部构建**按钮 。

将几何导入模型后，保存第二个版本：

1 从**文件**菜单中选择 **另存为版本**。

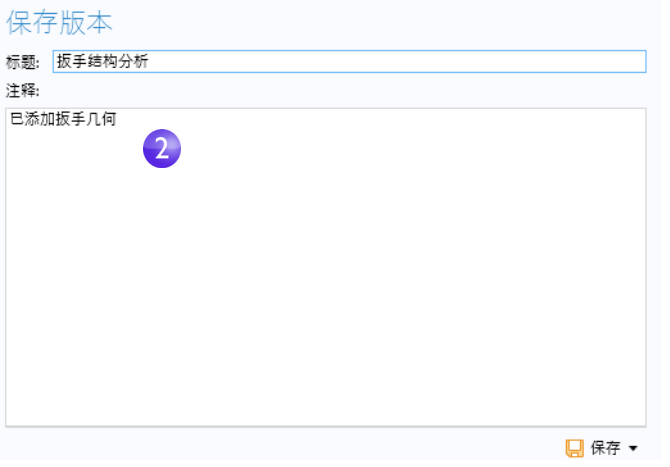


此时会打开**保存**窗口，并在选项列表中预先选中您的数据库。



由于该模型已经存在于数据库中，因此标题为**保存版本**。该标题与保存第一个版本时的标题相同。

2 在**标题**框中，将标题改为扳手结构分析，并在**注释**框中键入已添加扳手几何。



3 单击 **保存**按钮。

现在，有两个模型版本保存在数据库中。

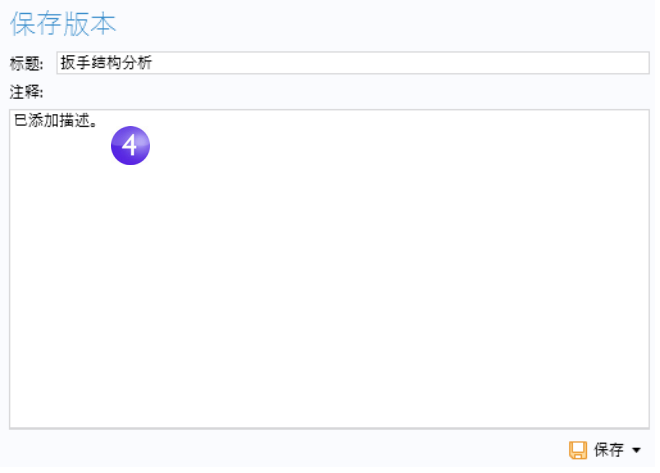
为了演示多个版本，我们将对模型做一个小改动，并通过为模型添加描述来保存另一个版本，即第三个版本。

1 单击**模型开发器**窗口中的根节点。

2 在**演示**栏的**描述**框中，键入扳手机械应力水平分析。

3 从**文件**菜单中选择 **另存为版本**。

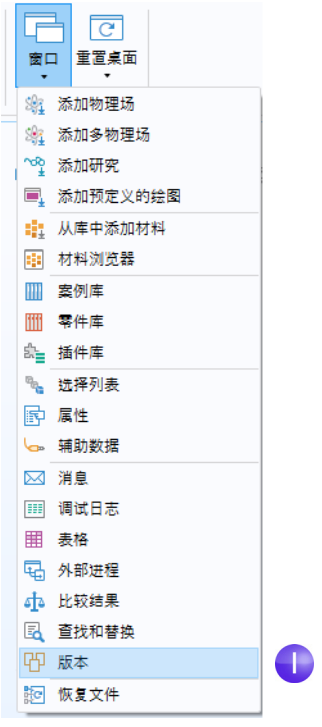
4 在**注释**框中键入 “已添加描述。”。单击 **保存**。



版本窗口

到此为止，您已在数据库中保存了三个模型版本。

1 从**主屏幕**选项卡的**布局**部分的**窗口**菜单 中，选择 **版本**以打开**版本**窗口。

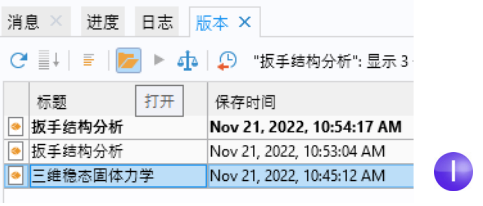


2 您将在表格中看到按时间顺序排列的三个版本，第一行是最新版本，最后一行是最旧的版本。表格中的第一行用粗体突出显示，表示它是 COMSOL Desktop 中的当前版本。

打开旧版本

您可以轻松地从**版本**窗口中打开旧版本的模型。

1 选择表格的最后一行，然后在工具栏中单击**打开**按钮 ；也可以双击该行。如果软件提示您保存任何未保存的更改，请选择**否**。



此时会在 COMSOL Desktop 中打开第一个版本。在这个版本中，**几何 1** 节点下没有**导入** 节点，并且**描述**框为空。

2 选择表格的中间行，并单击**打开** 。

此时会在 COMSOL Desktop 中打开第二个版本。在这个版本中，**几何**节点下现在显示**导入**节点，但**描述**框仍然为空。

3 选择表格的第一行，并单击**打开** 。

此时在 COMSOL Desktop 中打开最新的第三个版本。

使用模型草稿

您可能已经注意到，从文件系统打开模型时只需按 Ctrl+S 即可，而保存新模型版本则需要多个步骤。您需要打开**保存**窗口，并提供注释来描述您所做的更改（尽管注释不是必需的），然后单击**保存**按钮 。在保存多个版本后，您甚至可能意识到您的建模工作在朝着错误的方向发展，这可能导致您的版本历史记录中堆满了各种不需要的版本。

在处理模型时，一种更轻量级的选择是保存模型的草稿。您可以保存草稿的多个版本，而不影响原始模型。一旦您对草稿满意，就可以将其另存为原始模型的新版本。当然，您也可以选择完全放弃草稿，回到原始模型，然后开始创建新的草稿。

开始创建新草稿

我们继续处理扳手模型，但这次使用草稿。请确保您已在**版本**窗口中打开了最新 （第一行）的版本。

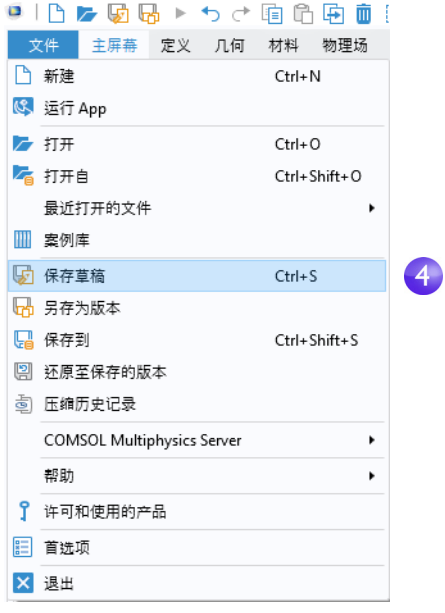
我们为扳手添加通用的钢材料，并将模型另存为新的草稿。

1 右键单击**组件 1 > 材料** 并选择**从库中添加材料** 。

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 关闭**添加材料**窗口。

4 从**文件**菜单中选择 **保存草稿**。您也可以使用键盘快捷键 Ctrl+S。



您现在已经创建了模型草稿的第一个版本。您可以在**版本**窗口中看到，这个草稿版本作为新行出现在表格中，位于原始模型三个版本的上方。草稿版本使用单独的钢笔图标 ( ) 与常规版本 ( ) 进行区分。请注意，这些常规版本属于

原始模型，而不是草稿本身 - 它们包含在表格中，是为了方便您更容易地跟踪草稿的来源。

标题	保存时间	保存者	分支	注释
扳手结构分析	**Nov 21, 2022, 12:55:48 PM**	**min**	**主分支**	**用户保存的"扳手结构分析"草稿。**
扳手结构分析	Nov 21, 2022, 10:54:17 AM	min	主分支	已添加描述。
扳手结构分析	Nov 21, 2022, 10:53:04 AM	min	主分支	已添加扳手几何
三维稳态固体力学	Nov 21, 2022, 10:45:12 AM	min	主分支	使用稳态研究建立三维固体力学模型。

保存其他草稿版本

与第 38 页的“示例 1：扳手结构分析”类似，现在指定对扳手施加的载荷，并保存草稿更改。

1 在**模型开发器**窗口中选择**参数 1** 。

2 在**设置**窗口的**参数**表中，输入以下设置：

- 在**名称**列中，输入 F。
- 在**表达式**列中输入 150[N]。
- 在**描述**列中输入作用力。

3 从**文件**菜单中选择 **保存草稿**。

再次选择**保存草稿**可以创建草稿的第二个版本 - **版本**窗口现在包含两个草稿版本和三个常规版本。

就像原始模型的常规版本一样，您可以通过选择表格中的行并单击**打开** 来检查较旧的草稿版本。

草稿本身就是数据库中的一个独立模型 - 与原始模型并存。您只需在 COMSOL Desktop 中打开其中一个，即可在它们之间来回切换。

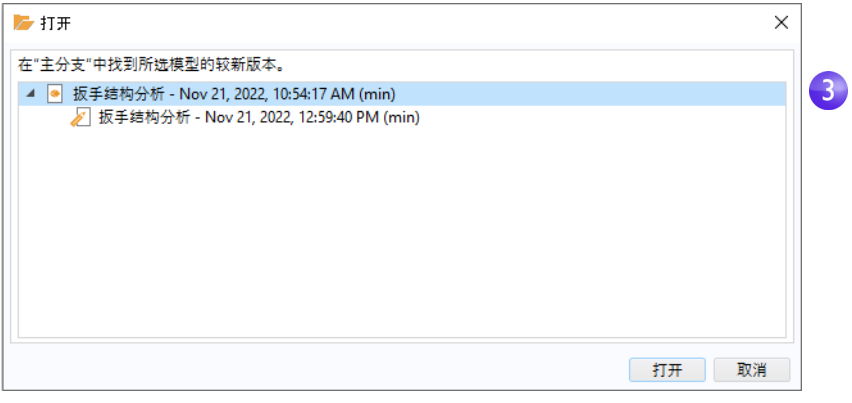
1 从**文件**菜单中选择**打开自** ( )。

2 在**打开**窗口中，从选项列表中选择**建模示例**数据库。

打开窗口会显示一个列表，其中包含草稿 ( ) 和原始模型 ( ) 的最新版本。

3 选择原始模型版本 ( ) 并单击**打开**按钮 。

“模型管理器”检测到有一个正在处理的原始模型的草稿，它所对应的草稿版本比模型的最新版本更新。此时会显示一个对话框，您可以在其中选择打开较新的草稿版本。



4 选择树中的顶部节点，然后单击**打开**以打开原始模型。 COMSOL Desktop 中会打开模型的最新版本 - 正如预期的那样，模型中既没有**结构钢**节点，也没有**参数**设置。

此时，您可以继续使用原始模型，从而隐含地放弃草稿工作。草稿本身可以稍后从数据库中手动删除。

假设您选择继续处理草稿。再次打开最新版本：

1 从**文件**菜单中选择**打开自** 。

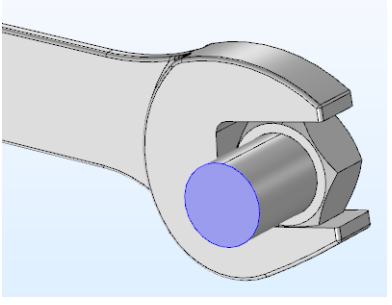
2 在**打开**窗口中，从选项列表中选择您的数据库。

3 选择草稿版本 ( ) 并单击**打开** 。

通过定义边界条件和网格设置来完成组件设置：

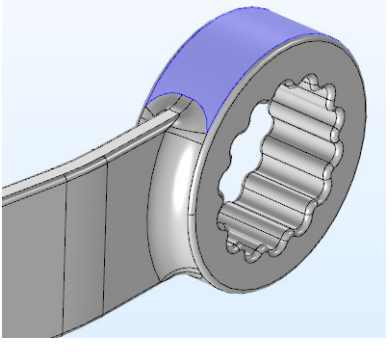
1 右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**固定约束** 。

2 在**图形**窗口中，旋转几何并选择部分建模的螺栓的前表面。**选择**列表中的**边界**编号为 35。



3 再次右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**边界载荷** 。

4 在**图形**窗口中选择套筒顶面 （边界 111）。



5 在**边界载荷设置**窗口的**力**栏中，选择**总力**作为**载荷类型**，然后在 **z** 分量的文本框中输入 -F。

6 选择**网格 1** 。定位到**网格设置**窗口的**物理场控制网格**栏，从**单元大小**列表中选择**很细化**。

7 在**设置**窗口中单击**全部构建** 按钮。

完成基本设置后，选择**保存草稿** 以保存第三个草稿版本。

标题	保存时间	保存者	分支	注释
扳手结构分析	**Nov 21, 2022, 1:10:05 PM**	**min**	**主分支**	**用户保存的"扳手结构分析"草稿。**
扳手结构分析	Nov 21, 2022, 12:59:40 PM	min	主分支	用户保存的"扳手结构分析"草稿。
扳手结构分析	Nov 21, 2022, 12:58:37 PM	min	主分支	用户保存的"扳手结构分析"草稿。
扳手结构分析	Nov 21, 2022, 10:54:17 AM	min	主分支	已添加描述。
扳手结构分析	Nov 21, 2022, 10:53:04 AM	min	主分支	已添加扳手几何
三维稳态固体力学	Nov 21, 2022, 10:45:12 AM	min	主分支	使用稳态研究建立三维固体力学模型。

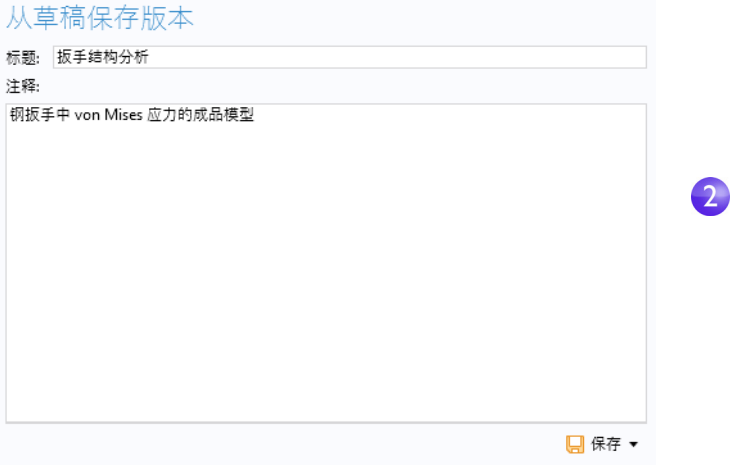
完成草稿

组件设置完成后，您可以将草稿工作保存回原始模型：

1 从**文件**菜单中选择 **另存为版本**。

此时会打开**保存**窗口，并在列表中预先选中您的数据库。标题为**从草稿保存版本**，作为将从草稿保存的原始模型的新版本。

2 在**注释**框中键入钢扳手中 von Mises 应力的成品模型。



3 单击**保存**按钮 。

打开**版本**窗口，您将看到所有草稿版本现在都已从表格中消失。取而代之的是原始模式的第四个版本，并且草稿本身已被删除。

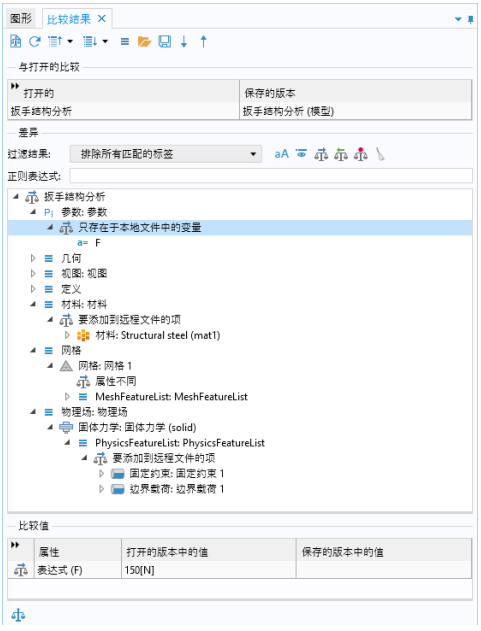
比较版本

当您从草稿保存模型时，可以看到对该模型所做的所有更改。

1 在**版本**窗口的表格中，右键单击第二行，然后选择**比较** ( )。

此时会打开**比较结果**窗口，其中显示 COMSOL Desktop 中的当前模型与选定版本的比较结果。

2 展开的树中显示力参数、钢材料、网格设置以及从草稿中添加的两个边界条件等。



此外，您也可以将两个旧版本相互进行比较：

1 在**版本**窗口中使用 Ctrl+ 单击操作来选择第二行和第三行，然后右键单击其中一行并选择**比较** 。

比较结果窗口会更新为比较这两个版本。

2 展开模型树并选择**属性不同**子节点。在**比较值**表中，您可以找到您在第三个模型版本中添加的描述。

3 关闭**比较结果**窗口。

排除已构建、计算并绘制的数据

接下来，我们运行研究。首先，请确保打开最新的模型版本：

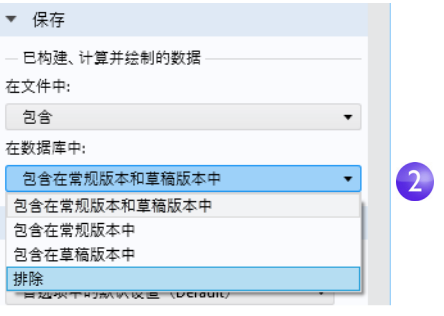
1 在**版本**窗口中，双击第一行。

2 右键单击**研究 1** 并选择**计算** 以求解模型。计算只需几秒钟即可完成，此时**图形**窗口中默认的**体**图会显示 von Mises 应力。

存储模型生成的仿真数据可能需要大量的磁盘空间。对于这种可重现的数据（例如已构建、计算并绘制的数据），可能并不适合保存在数据库中，甚至由于其规模庞大而不能保存到数据库中。为了控制在数据库中保存哪些数据：

1 在**模型开发器**窗口中选择根节点。

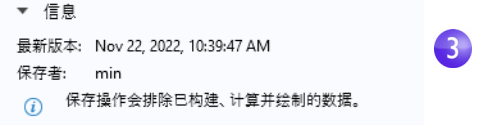
2 在**设置**窗口的**保存**栏中，从**已构建、计算并绘制的数据**下的**在数据库中**列表中选择**排除**。



请注意，通过使用**在文件中**列表菜单，您还可以在保存到文件系统时排除已构建、计算并绘制的数据。

3 从**文件**菜单中选择 **另存为版本**。

此时会打开数据库的**保存**窗口，并在**信息**栏中显示消息：**保存操作会排除已构建、计算并绘制的数据**。



4 在**注释**框中键入 “保存时未包含生成的仿真数据。”。

5 单击**保存** 。

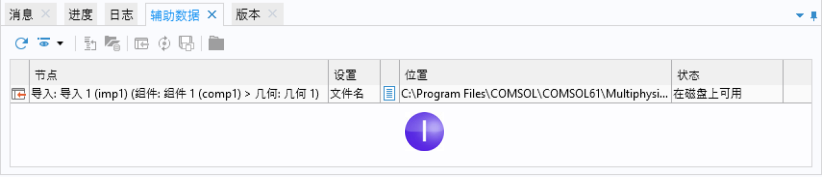
保存后，模型在 COMSOL Desktop 中保持其已求解的状态。转到**文件**菜单，选择 **还原至保存的版本**，然后在出现的对话框中单击**是**。此时会打开不包含解的最新保存版本。您可以通过右键单击**研究 1** 并选择**计算** 来重现（到目前为止）丢失的解。

在数据库中导入辅助数据

您可能已经注意到，虽然模型在数据库中受版本控制，但 CAD 输入文件却并非如此。您可以遵循以下操作步骤将文件导入数据库：

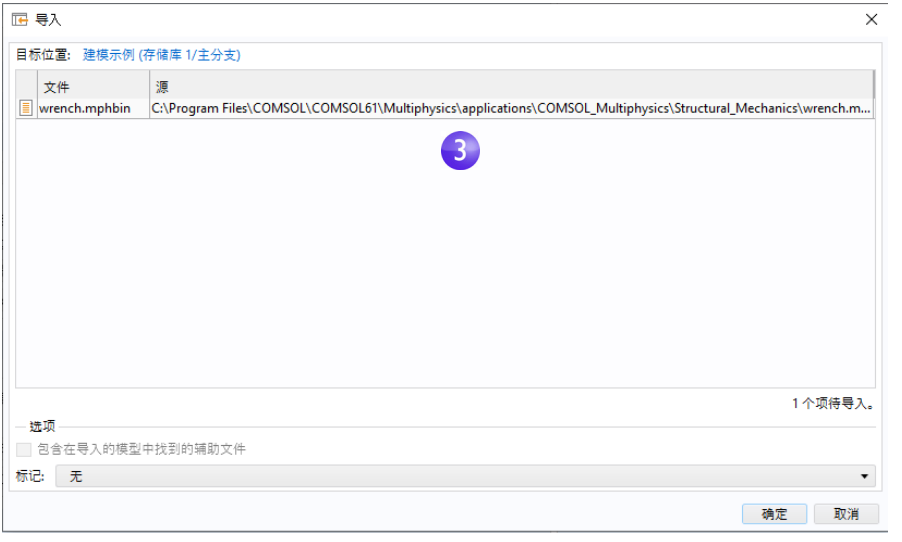
1 从**主屏幕**工具栏的**布局**部分的**窗口**菜单 中，选择**辅助数据**以打开**辅助数据**窗口。

辅助数据窗口会显示模型使用的输入文件。在本例中显示单行，对应于**导入** 节点中使用的 CAD 文件。



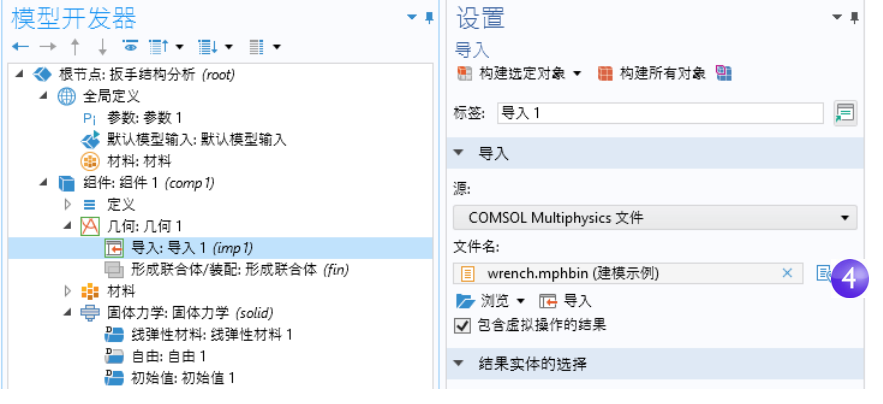
2 选择表格行，然后右键单击任意一行，并选择**导入到数据库** 。

3 此时会显示**导入**对话框，其中在表格中显示文件 wrench.mphbin。



4 单击**确定**。

在**模型开发器**窗口中选择**导入** 节点。**设置**窗口的**导入**栏中的**文件名**框现在显示对上传到数据库的文件的引用。



最后，将模型保存到数据库。

1 从**文件**菜单中选择 **另存为版本**。

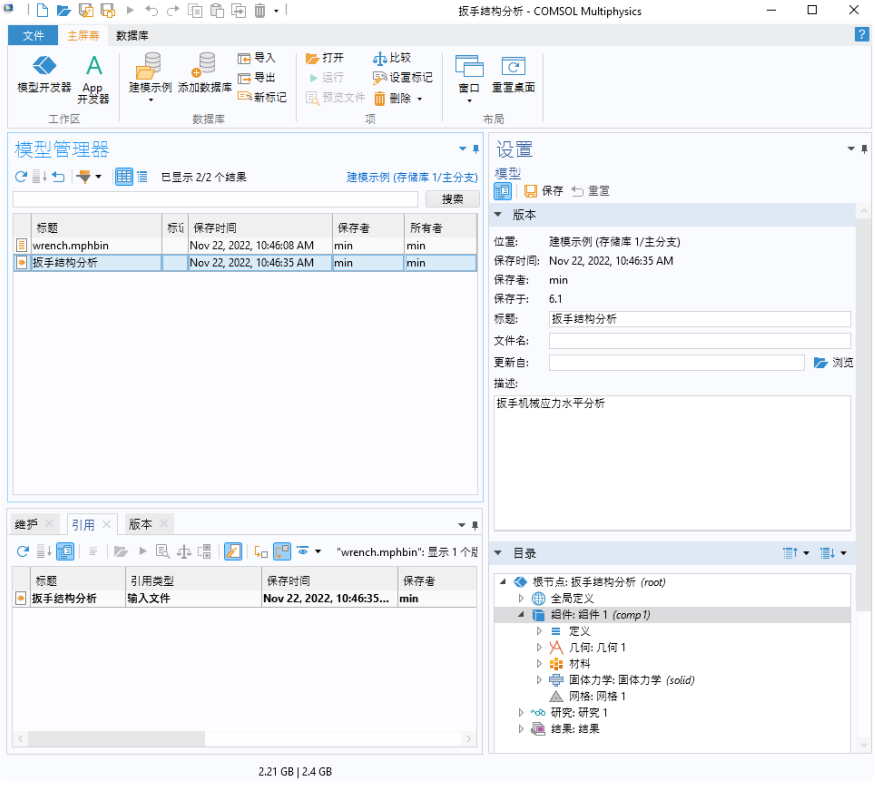
2 在**注释**框中键入 “从数据库引用的 CAD 文件。”。单击**保存** 。

模型管理器工作区

关于 “模型管理器” 的简介到此结束。有关使用 “模型管理器” 的详细信息，请参阅 *Model Manager Reference Manual* 一书。

建议您进一步探索 “模型管理器” 工作区，深入了解 “模型管理器” 的强大功能。这是 COMSOL Desktop 中的一个专用工作区，用于处理与使用 “模型管理器” 有关的任务。

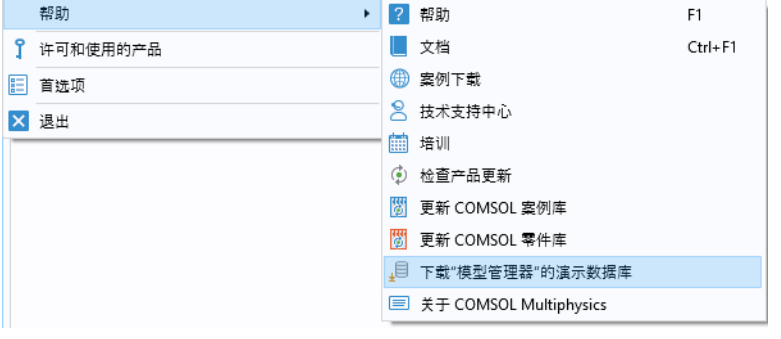
您可以单击**主屏幕**工具栏的**工作区**部分中的**模型管理器** 按钮，来打开 “模型管理器” 工作区。在 “模型管理器” 工作区中，您会看到 “模型管理器” 工具栏以及属于该工作区的各种窗口，其中显示模型和 CAD 文件的最新版本。



如需进一步了解工作区的功能，您可以执行以下操作，例如：

- 选择一个模型，然后在**设置**窗口的**目录**栏中展开模型树。您可以在此浏览模型的目录，而不将其打开。
- 通过应用各种**项和目录过滤器**来搜索模型。举例来说，**物理场**过滤器可用于查找**固体力学**接口（ ），**参数**过滤器可以查找作用力 150[N]。
- 右键单击模型并选择**引用**（ ）以查看该模型与**引用**窗口中的 CAD 文件之间的数据库关系。
- 右键单击 CAD 文件并选择**版本**（ ）以在**版本**窗口中查看该文件的所有版本（当前只有一个）。
- 右键单击模型并选择**提交**（ ）以打开**提交**窗口。双击从顶部开始的第三个表格行。您将看到有关提交的详细信息，其中从草稿保存了原始模型的新版本，而草稿本身已被删除。

为了更轻松地测试“模型管理器”的各种特征，您可以从**文件**菜单中选择**帮助 > 下载 ‘模型管理器’ 的演示数据库”**，来下载一个演示数据库。



该演示数据库包含“案例库”中的模型和相关文件。

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以外，您还可以导入通过 CAD 软件创建的几何。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 248 页的 “附录 E - 使用 LiveLink™ 模块实现连接”获取相关列表。请注意，“设计模块”除了包含 “CAD 导入模块”中的特征以外，还添加了尺寸和约束功能。“设计模块”还包含额外的三维几何建模操作，例如放样、倒圆角、倒斜角、抽取中面和加厚。

如果您尚未完成这一步，请从第 72 页的 “示例 2：母线板 - 多物理场模型”开始，按照第 39 页的“模型向导”一节中的步骤来添加物理场和研究，然后按照**全局定义**下的步骤添加参数，本节的其余部分将使用这些参数。然后返回本节，继续学习几何建模相关知识。

或者，您也可以从**案例库**树的 **COMSOL Multiphysics > 多物理场**下加载 **busbar_geom** 模型。然后，在模型树中右键单击**几何**节点，并选择**清除序列**。这将删除模型树中的所有几何操作。

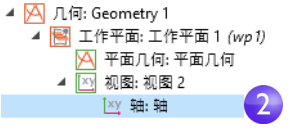
几何序列的第一步是绘制母线板的剖面图。

1 在**组件 1** 节点下，右键单击**几何 1** 并选择**工作平面**。定位到**工作平面**的**设置**窗口：

- 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。

接下来，继续编辑**工作平面 1** 中的轴和栅格设置。

2 在**模型开发器**窗口中，展开**视图 2** 节点，并单击**轴**。



3 在**轴**的**设置**窗口中：

定位到**轴**栏：

- 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。

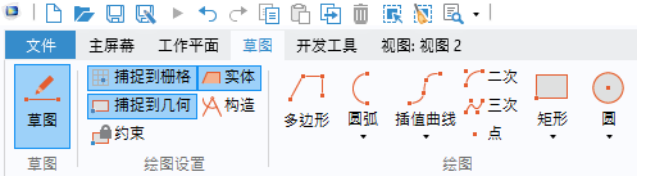
定位到**栅格**栏：

- 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**草图**选项卡中的绘图工具，您可以使用交互式绘图功能来创建几何。



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。请注意，您可以在功能区的**工作平面**选项卡中以同样的方式添加几何对象。为清楚起见，本例将演示如何通过非交互式的方法来创建几何 （不使用**草图**选项卡）。

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**窗口的**工作平面 1** 节点下，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`。

单击**构建选定对象**按钮 。

6 创建另一个矩形。在**工作平面 1** 节点下，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-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** 节点下，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。

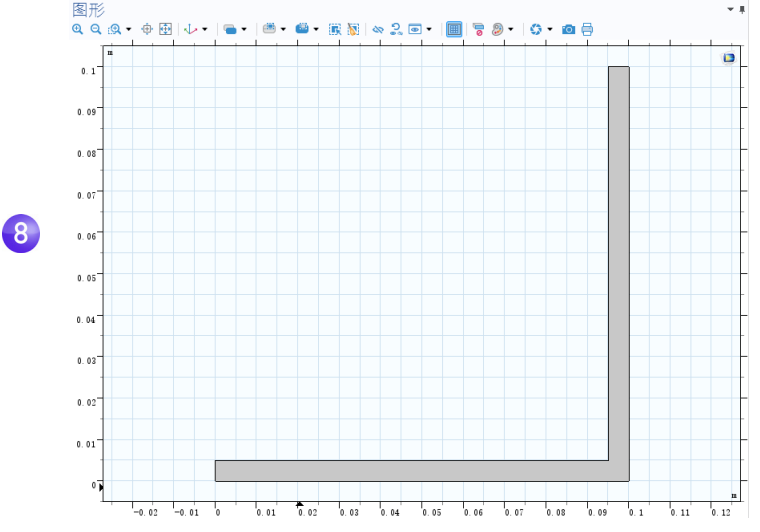
为了方便选择几何，您可以在**图形**窗口中显示几何标签。在**模型开发器**窗口的**几何 1 > 工作平面 1** 下，单击**视图 2** 节点。然后转到**视图**的**设置**窗口，选中**显示几何标签**复选框。

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**特征。转到功能区中的**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“差集”的“要减去的对象”**，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**。

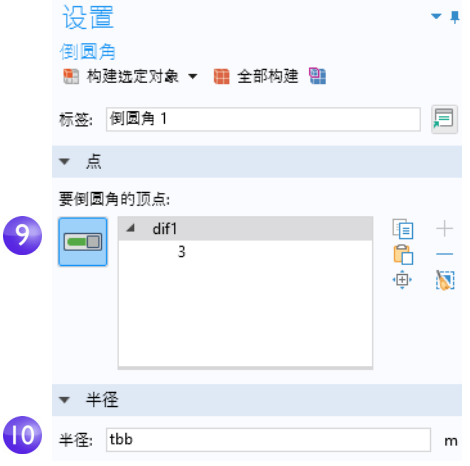
构建选定的几何后，您会得到一个反 L 形的剖面。继续对这个 L 形剖面的拐角进行倒圆。



9 在**工作平面 1** 节点下，右键单击**平面几何** 并选择**倒圆角** 。

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

- 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**倒圆角**的**设置**窗口中，单击**添加到 “倒圆角” 的活动选择**按钮 ，或右键单击**选择列表**。



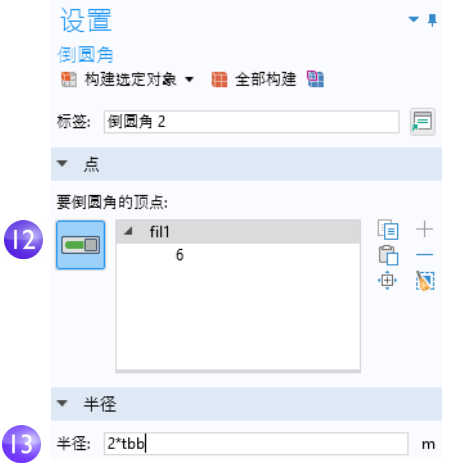
10 在**半径**框中输入 tbb。单击**构建选定对象** 。

此时便会在内拐角处创建圆角。

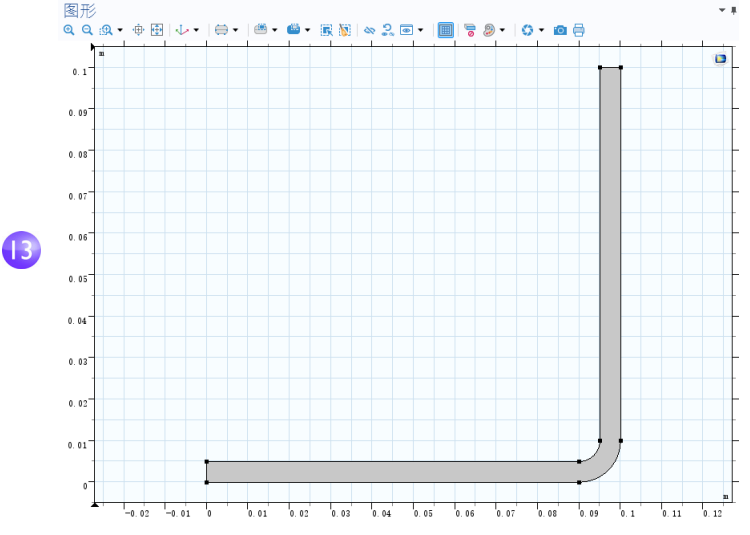
11 对于外拐角，右键单击**平面几何** 并选择**圆角** 。

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** 。



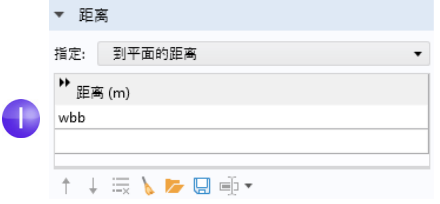
结果应与下图相符：



“设计模块”的**草图**选项卡中的工具可用于交互式绘图，以及对圆角和一般二维草图进行尺寸标注。

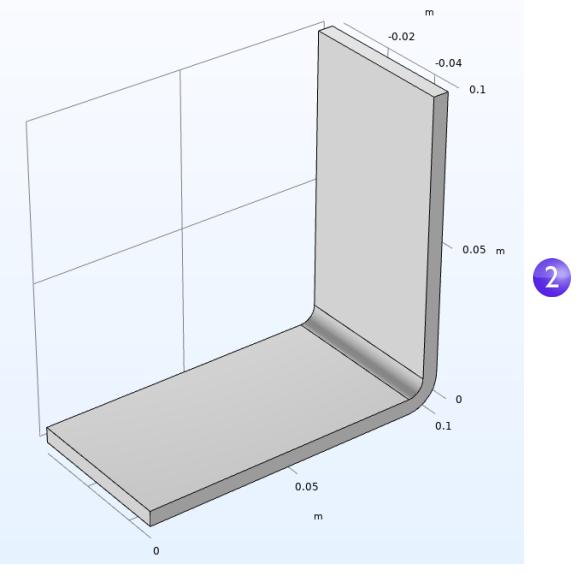
接下来，拉伸工作平面以创建三维母线板几何。

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**工作平面 1** 并选择**拉伸**。定位到**拉伸**的**设置**窗口，在**到平面的距离**表中输入 wbb （替换默认值）以拉伸至剖面的宽度。



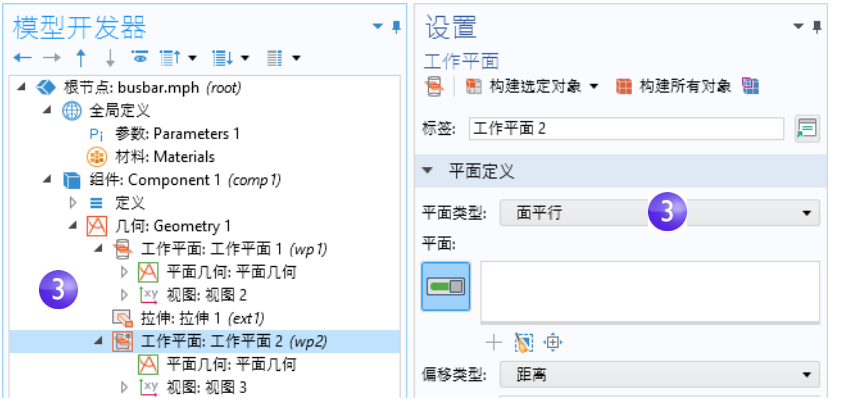
该表格支持输入多个值，以创建采用不同材料的夹层结构。在本例中，只需要拉伸一个层。

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）。



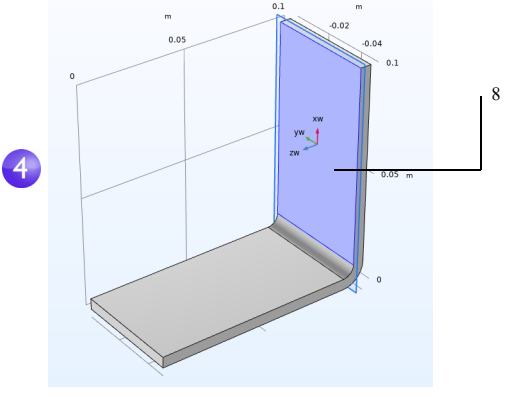
接着，通过拉伸在两个工作平面上绘制的两个圆来创建钛螺栓。

3 在**模型开发器**窗口中，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 开始绘制第一个圆来表示第一个螺栓的位置。在**图形**工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮 。

6 在**工作平面 2** 节点下，右键单击**平面几何** 并选择**圆** 。

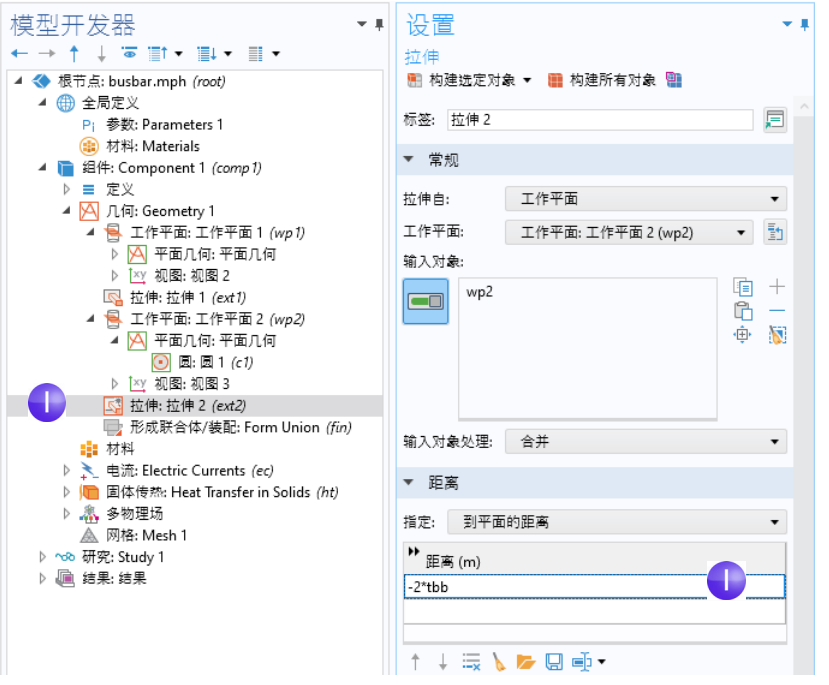
定位到**圆**的**设置**窗口：

- 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)。

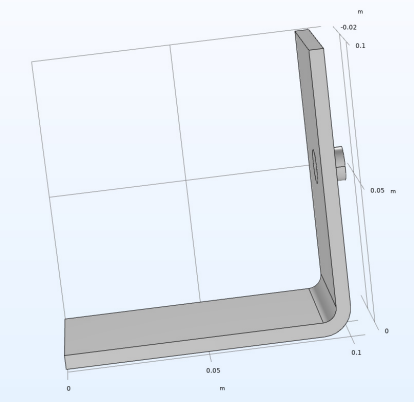
单击**构建选定对象** 。

接下来，我们通过添加拉伸操作继续创建螺栓。

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**工作平面 2** 并选择**拉伸**。定位到**拉伸**的**设置**窗口，在**到平面的距离**表的第一行输入 `-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。

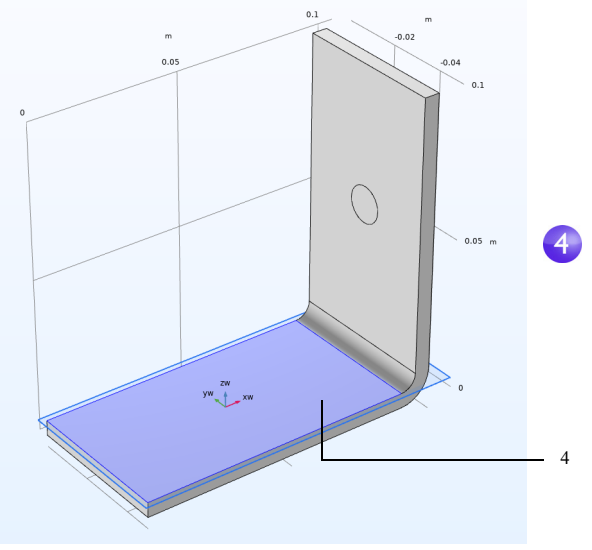


2

下面，我们绘制其余两个螺栓。

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，选择**面平行**作为**平面类型**。

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 ，以获取更佳的几何视图。

如果要参数化其余两个螺栓的位置，您可以添加圆来形成螺栓的横截面。

6 在**工作平面 3** 节点下，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。

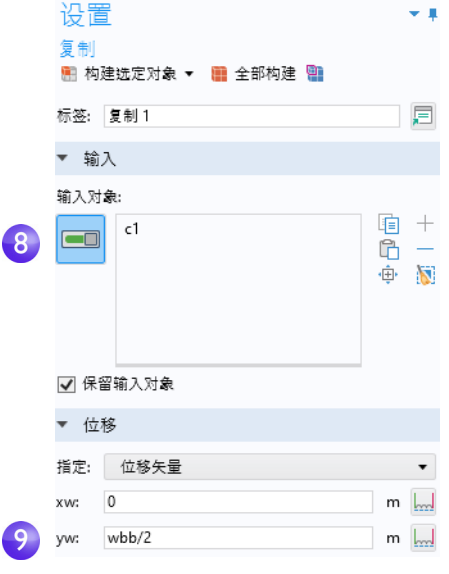
单击**构建选定对象** 。

复制刚才创建的圆，在母线板中生成第三个螺栓。

7 在**工作平面 3** 节点下，右键单击**平面几何** 并选择**变换 > 复制** 。

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。

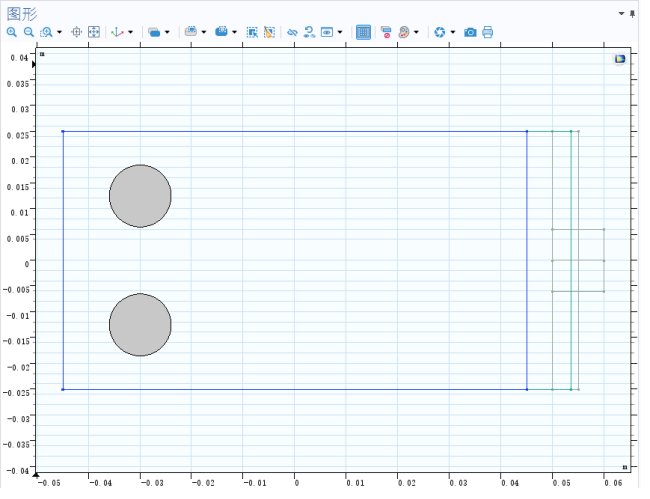
9 在**复制**的**设置**窗口中，在**位移**栏的 **yw** 框中输入 wbb/2。



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。

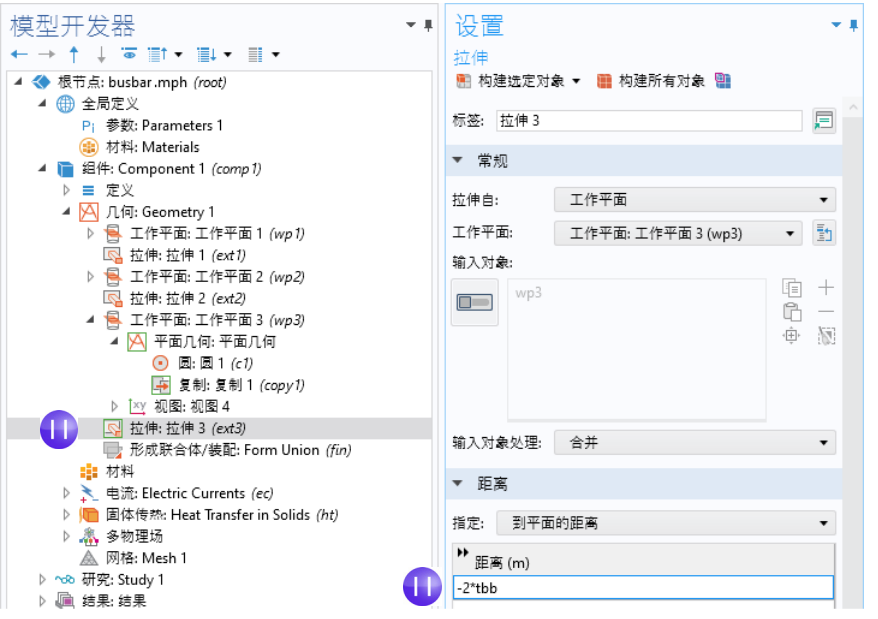
现在，工作平面中显示的几何应与下图相符。

10

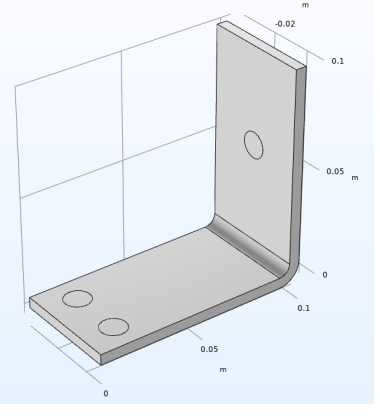


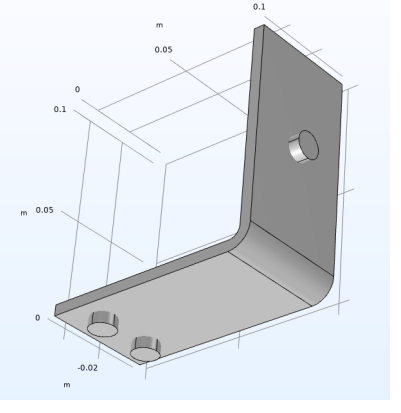
接下来，继续对圆执行拉伸操作。

11 在**模型开发器**窗口中，右键单击**工作平面 3** 并选择**拉伸**。定位到**拉伸**的**设置**窗口，在**到平面的距离**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`。

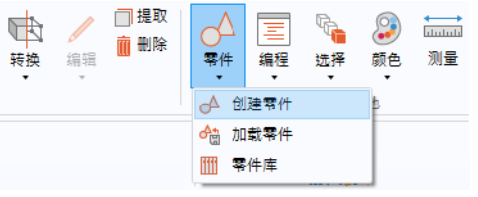




创建零件和使用零件库

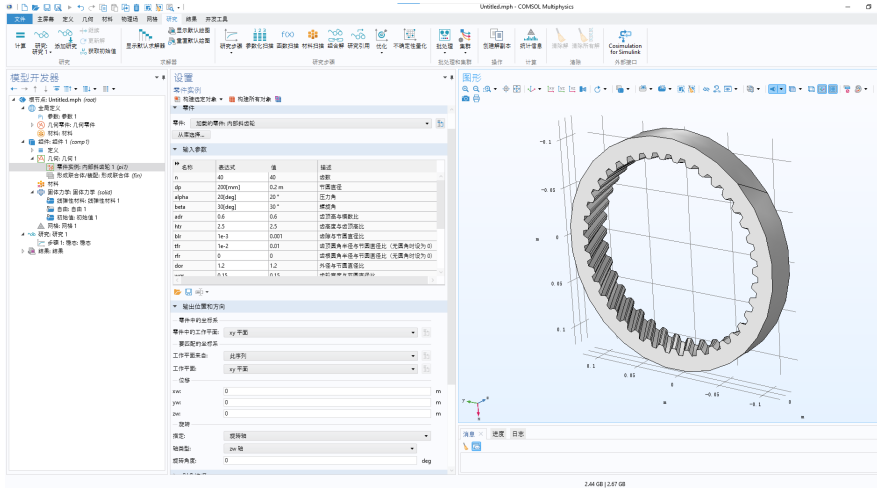
建立母线板或其他几何模型后，您可以方便地将其保存以供将来使用，从而避免不必要的工作。在刚刚完成的操作步骤中，几何直接存储在 COMSOL 模型文件中，该文件还将用于建立完整的母线板模型。当然，您也可以创建可重用或参数化的零件，作为更复杂的 COMSOL 模型几何的构建块，该零件存储在单独的文件中，可通过 “零件库” 进行访问。

在构建母线板几何时，您使用了**几何**和**工作平面**选项卡中的特征。**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”。创建新零件后，它们会添加到模型树的**全局定义**部分的 “零件” 父节点下。要从库中添加零件，您也可以右键单击**几何**节点，然后选择**零件 > 零件库**。

下图显示“多体动力学模块”零件库中的**内部斜齿轮**零件，其中包含 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*。

如果您想要继续学习母线板教程，请返回第 84 页的“材料”一节。

附录 B - 键盘和鼠标快捷方式

以下快捷方式适用于 “模型开发器”、“App 开发器”、“模型管理器” 和 “图形” 窗口。

键盘快捷键

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	根据需要打开 “帮助” 窗口，以显示所选节点或窗口的上下文帮助文本。
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	根据新的定义来更新解，而无需重新求解模型。更新降阶模型数据。 此外，在 Windows 上，在 “App 开发器” 的 “方法编辑器” 调试工具中继续操作。
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。 此外，在 Windows 上，在 “App 开发器” 的 “方法编辑器” 调试工具中继续操作。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
F7	F7	在几何和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。 此外，在 Windows 上，进入“App 开发器”中的 “方法编辑器”调试工具。
F8	F8	构建几何和网格，计算整个求解器序列，更新结果数据和绘图，或者运行方法或方法调用。 此外，在 Windows 上，在 “App 开发器”中创建可执行文件或插件。
F9		在 Windows 上，检查 “App 开发器”中方法的语法。
Del	Del	删除表格中选定的节点、对象或行。
Esc 键	Esc 键	取消正在进行的交互式二维绘图和三维剪裁操作。
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。
上箭头	上箭头	在 “模型开发器”中移至上方节点。当聚焦到 “图形”窗口中的三维几何时，突出显示它的下一个实体。
下箭头	下箭头	在 “模型开发器”中移至下方节点。当聚焦到 “图形”窗口中的三维几何时，突出显示它的上一个实体。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
Alt+ 数字	见注释	仅适用于 Windows 版本：如果按字符键盘上方的数字，则运行相应的 “快速访问工具栏” 命令；否则，请插入相应的 ASCII 字符（在 Windows 上需要使用数字键盘）。要在 macOS 上输入特殊的 ASCII 字符，您可以改用特定的 Unicode Hex Input 键盘布局。
Alt+ 左箭头	Ctrl+ 左箭头	在模型树中移至上一个选定的节点。
Alt+ 右箭头	Ctrl+ 右箭头	在模型树中移至下一个选定的节点。
Ctrl+A	Command+A	选择所有域、边界、边或点；选择表格中的所有单元格。
Ctrl+B	不可用	在 “App 开发器” 中用于启用和移除断点。
Ctrl+Shift+B	不可用	在 “App 开发器” 中用于启用和禁用断点。
Ctrl+C	Command+C	复制编辑框中的文本。复制图形和绘图窗口中的图像。
Ctrl+D	Command+D	清除 “模型开发器” 中所有域、边界、边或点的选择。清除 “表单编辑器” 窗口中的所有选择。
Ctrl+Shift+D	Command+Shift+D	在模型树中复制粘贴选定的节点。
Ctrl+F	Command+F	查找搜索字符串。
Ctrl+G	Command+G	对节点进行分组。
Ctrl+Shift+G	Command+Shift+G	取消节点分组。
Ctrl+K		创建、使用或重命名模型树节点的快捷键 （用于 “App 开发器”）。
Ctrl+L	Command+L	快速截图。
Ctrl+N	Command+N	新建模型。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
Ctrl+O	Command+O	从文件系统中打开模型文件。
Ctrl+Shift+O	Command+Shift+O	从“模型管理器”数据库或文件系统中打开模型文件。
Ctrl+P	Command+P	打印绘图窗口的内容。
Ctrl+S	Command+S	将模型文件保存到文件系统。
Ctrl+Shift+S	Command+Shift+S	将模型文件保存到“模型管理器”数据库或文件系统。
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+1		在方法中创建局部变量或更正现有变量的类型。
Ctrl+7		在方法中打开和关闭注释。
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。
Ctrl+Tab	Ctrl+Tab	将焦点切换到桌面上的下一个窗口。
Ctrl+Shift+Tab	Ctrl+Shift+Tab	将焦点切换到桌面上的上一个窗口。
Ctrl+Shift+A		从“模型开发器”或“模型管理器”切换到“App 开发器”工作区。
Ctrl+Shift+J		从“模型开发器”或“App 开发器”切换到“模型管理器”工作区。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
Ctrl+Shift+M		从 “App 开发器” 或 “模型管理器” 切换到 “模型开发器” 工作区。
Ctrl+Alt+ 左箭头	Command+Alt+ 左箭头	将焦点切换到 “模型开发器” 窗口。
Ctrl+Alt+ 右箭头	Command+Alt+ 右箭头	将焦点切换到 “设置” 窗口。
Ctrl+Alt+ 上箭头	Command+Alt+ 上箭头	将焦点切换到 “设置” 窗口中的上一栏。
Ctrl+Alt+ 下箭头	Command+Alt+ 下箭头	将焦点切换到 “设置” 窗口中的下一栏。
Ctrl+F4	Command+W	关闭 COMSOL Desktop 中可关闭的活动窗口。
Ctrl+F8		测试 App。
Ctrl+Alt+ 左箭头	Command+Alt+ 左箭头	将焦点切换到 “模型开发器” 窗口。
Ctrl+Alt+ 右箭头	Command+Alt+ 右箭头	将焦点切换到 “设置” 窗口。
Ctrl+Alt+ 上箭头	Command+Alt+ 上箭头	将焦点切换到 “设置” 窗口中的上一栏。
Ctrl+Alt+ 下箭头	Command+Alt+ 下箭头	将焦点切换到 “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+Pause	Command+. （Command + 句点）	在测试运行 App 时停止运行方法。
Ctrl+/ 或 Ctrl+Space	Ctrl+/	打开预定义的物理量列表，可插入 “表达式” 编辑框。
R	R	在鼠标旋转的自动与手动旋转中心之间进行切换（适用于三维）。
+ 或 - 键盘按键，或 向上 / 向下箭头按钮	+ 或 - 键盘按键，或 向上 / 向下箭头按钮	当焦点在 “图形” 窗口中时，可以在三维几何实体 （域、边界、边、点）之间循环选择。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
+, -	+, -	在 “图形”窗口中突出显示三维几何的下一个或上一个实体。在“模型开发器”中展开或折叠分支。
乘号键	Alt+ 右箭头	展开树的选定部分。
除号键	Alt+ 左箭头	折叠树的选定部分。
上页 / 下页	上页 / 下页	在 COMSOL Desktop 环境的窗口中向上 / 向下移动。

鼠标快捷键

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
单击并按住鼠标按键，同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	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	在图像平面上朝任意方向移动可见框 （平移）。
单击中键并按住鼠标按键，同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	绕鼠标操作开始的位置放大/缩小场景。
按 Ctrl 键并使用鼠标滚轮。	与 Windows 相同	绕鼠标操作开始的位置放大或缩小场景。
单击中键并使用鼠标滚轮。	与 Windows 相同	绕鼠标操作开始的位置放大/缩小场景，但步幅稍大。
按 Ctrl 并单击左键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同	绕图像平面的 x 和 y 轴旋转来倾斜或平移相机。
按 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	在与图像平面平行的平面上移动相机。
按 Ctrl 并单击鼠标中键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同	移动相机使其靠近和远离对象（推近 / 拉远）。
按 Ctrl 并单击鼠标中键。	与 Windows 相同	缩放到模型中的点 （由鼠标位置确定）周围的区域。

快捷方式 (WINDOWS, LINUX)	快捷方式 (MACOS)	操作
按 Ctrl+Alt 并单击左键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同	绕相机正对的方向旋转场景中的对象。
按 Alt 并单击左键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同	绕与相机原点和场景旋转中心（滚动方向）相交的轴旋转场景中的对象。
按 Alt 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	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 Alt 并单击鼠标中键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同	沿相机与场景旋转点之间的轴移动相机。
使用鼠标中键单击模型。	与 Windows 相同	设置旋转中心。
按 X、 Y 或 Z 并单击左键。同时按住键盘键和鼠标按键，并拖动鼠标。	与 Windows 相同	分别绕 X、 Y 或 Z 轴旋转。
R	R	在手动和自动旋转中心之间进行切换。
+ 或 - 键盘按键，或 向上 / 向下箭头按钮。	+ 或 - 键盘按键，或 向上 / 向下箭头按钮	当焦点在 “图形”窗口中时，可以在三维几何实体 （域、边界、边、点）之间循环选择。

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”功能或者另存为 MATLAB® 或 Java® 的模型文件，可以录制操作序列并将其另存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。以下页面列出了最常用的内置元素以及相应的保留名称。如需更详细的内置元素列表，请参阅 *Programming Reference Manual* 和 *Application Programming Guide*。

APP 使用的变量

您可以在 App 中使用模型参数和变量，例如，可以允许 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

您可以从“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} ($\sim 2.2204 \cdot 10^{-16}$)
虚部单位	`i`, `j`	`i`, `sqrt(-1)`
无穷大， ∞	`inf`, `Inf`	大于浮点表示法处理范围的值
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]
阿伏加德罗常数	N_A_const	6.02214076e23[1/mol]
玻尔兹曼常数	k_B_const	1.380649e-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	1.602176634e-19[C]
法拉第常数	F_const	96485.3365[C/mol]
精细结构常数	alpha_const	7.29735298e-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 条件下）	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	2*alpha_const*h_const/c_const/e_const/e_const
真空介电常数（电常数）	epsilon0_const	1/mu0_const/c_const/c_const
普朗克常数	h_const	6.62607015e-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。示例用法包括：

- 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

参数可以根据数字、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。变量可以为标量或场，并能具有单位。

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。下表包含一些最重要的内置变量。如需完整列表，请参阅 *Reference Manual*。

内置变量

名称	描述	类型
curv	二维边界曲率	场变量
curv1,curv2	三维边界的主曲率分量	场变量
dom	域、边界、边或点的域编号	场变量
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。	场变量
freq	频率	全局变量
geomapproxdist	对于每个单元，此变量都表示其中的节点从几何图形移动的距离。	场变量
h	网格单元大小 （单元最长边的长度）	场变量
hinscribed	单元内接直径	场变量
lambda	特征值	全局变量
linearizedelem	强制为线性的单元	场变量
numberofdofs	自由度数	全局变量
meshelement	每种类型的网格单元数	场变量
meshelementall	网格单元数	场变量
meshtype	网格单元的网格类型索引；它是单元的边数。	场变量
meshvol	（线性化）单元的体积	场变量
nx,ny,nz,dnx,dny,dnz,unx,uny,unz	边界表面法矢的法向分量。 x 方向的向下和向上法向分量分别为 dnx 和 unx， y 方向和 z 方向也类似如此。	场变量
phase	相角	全局变量

qual, qualcondition, qualcurvedskewness, qualgrowth, qualmaxangle, qualskewness, qualvollength	网格质量测量	场变量
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。	场变量
realdetjacmin	每个单元的标量场变量，这些单元已定义为相应单元的 reldetjac 变量的最小值。 如果单元的 reldetjacmin 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。	场变量
s,s1,s2	曲线和曲面参数化变量	场变量
t	时间	全局变量
tcurvx,tcurvy,tcurv1x, curv1y,tcurv1z,tcurv2x, tcurv2y,tcurv2z	相应曲率变量的切向分量	场变量
tx,ty,t1x,t1y,t1z, t2x,t2y,t2z	对应于曲线和曲面参数化的切矢分量	场变量
qual	介于 0 （低质量）到 1 （高质量）之间的网格质量测量	场变量

用于生成内置变量的用户定义变量

默认名称	描述	类型
x, y, z	空间坐标 （笛卡尔）	场变量
r, phi, z	空间坐标 （柱）	场变量
u, T 等	因变量 （解）	场变量

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 和 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 为内置变量，用户不能更改其名称。）

函数

“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 （弧度）	acos(x)
acosh	反双曲余弦	acosh(x)
acot	反余切 （弧度）	acot(x)
acoth	反双曲余切	acoth(x)
acsc	反余割 （弧度）	acsc(x)
acsch	反双曲余割	acsch(x)
arg	相角 （弧度）	arg(x)
asec	反正割 （弧度）	asec(x)
asech	反双曲正割	asech(x)
asin	反正弦 （弧度）	asin(x)
asinh	反双曲正弦	asinh(x)
atan	反正切 （弧度）	atan(x)
atan2	四象限反正切 （弧度）	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)
binomial	二项式系数	binomial(n,k)

名称	描述	语法示例
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)
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)
erfinv	逆误差函数	erfinv(x)
exp	指数	exp(x)
factorial	非负整数的阶乘	factorial(n)
floor	向下舍入为最接近的整数	floor(x)
gamma	伽马函数	gamma(x)
gcd	最大公约数	gcd(a,b)
imag	虚部	imag(u)
lcm	最小公倍数	lcm(a,b)
legendre	勒让德多项式	legendre(l,x)
legendre	关联的勒让德函数	legendre(l,m,x)
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)
poweps	幂，用于需要近零计算的表达式的导数	poweps(x,n)
psi	Psi 函数及其导数	psi(x,k)
random	随机函数，均匀分布	random(x,y,...)
randomnormal	随机函数，正态分布	randomnormal(x,y,...)
range	创建指定范围的数	range(a,step,b)
real	实部	real(u)

名称	描述	语法示例
round	舍入为最接近的整数	round(x), round(x,p)
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)
sphericaly	球谐函数	sphericaly(l,m,theta,phi)
sphericalyr	实球谐函数	sphericalyr(l,m,theta,phi)
sqrt	平方根	sqrt(x)
sqrteps	平方根，用于需要近零计算的表达式	sqrteps(x)
tan	正切	tan(x)
tanh	双曲正切	tanh(x)
zernike	泽尼克多项式	zernike(n,m,r,phi)

内置运算符函数

这些内置函数的特性与内置数学函数不同。它们可能不属于介绍性文本范畴，但在此列出以使保留名称列表完整。有关更多信息，请参阅 *Reference Manual*。

名称	名称	名称	名称
adj	depends	isinf	sphavg
at	dest	linsol	sphint
atlocal	dflux	lintotal	stddev
atonly	diskavg	lintotalavg	subst
at0	diskint	lintotalpeak	substval
at1	down	lintotalrms	sum
at2	dtang	linzero	test
at3	elemavg	mean	timeavg
atent0	elemgpmax	nif	timeint
atent1	elemgpmin	nojac	timemax
atent2	elemint	noenv	timemin
atent3	emetric	novar	treatasconst
attimemax	env	noxd	try_catch
attimemin	error	pd	uflux

名称	名称	名称	名称
atxd	*frame*.dt	ppr	up
atxd0	fsens	pprint	var
atxd1	fsensimag	prev	with
atxd2	gpeval	reacf	withparam
atxd3	if	realdot	withsol
ballavg	integrate	residual	
ballint	isdefined	*scope*.atent*i*	
bdf	islinear	*scope*.at*i*	
bndenv	isnan	sens	
centroid	jacdepends	setconst	
circavg	laginterp	setind	
circint	lindev	setval	
circumcenter	linper	shapeorder	
d	linpoint	side	

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（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	函数名称即为该函数的标识符，例如 an1。 该函数是其变元的数学表达式。 示例：给定变元 x 和 y，其定义为 sin(x)*cos(y)。 该函数具有任意数量的变元。	函数名称后紧跟括号，括号中为逗号分隔的变元。例如： an1(x,y)
插值	函数名称即为该函数的标识符，例如 int1。 插值函数由包含离散点函数值的表格或文件定义。 文件格式如下：电子表格、网格或分段。 该函数具有一到三个变元。	函数名称后紧跟括号，括号中为逗号分隔的变元。例如： int1(x,y,z)
分段	函数名称即为该函数的标识符，例如 pw1。 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。 此函数具有一个变元，该变元在不同的区间具有不同的定义，它们不能重叠或有任何间断。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： pw1(x)

模板名称	变元和定义	语法示例
高斯脉冲	函数名称即为该函数的标识符，例如 gp1。 高斯脉冲函数根据表达式定义一条钟形的曲线 $y(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ 该函数由平均参数 x_0 和标准差 σ 定义。 该函数具有一个变元。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： gp1(x)
斜坡	函数名称即为该函数的标识符，例如 rm1。 斜坡函数呈线性增加，其用户定义的斜率在某个指定时间开始。 该函数有一个变元，它也可以进行平滑。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： rm1(x)
矩形波	函数名称即为该函数的标识符，例如 rect1。 矩形波函数在某个区间中为 1，而在其他任意位置均为 0。 该函数有一个变元。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： rect1(x)
阶跃	函数名称即为该函数的标识符，例如 step1。 阶跃函数会在某个位置从 0 突变为其他某个值 （幅值）。 该函数有一个变元，它也可以进行平滑。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： step1(x)
三角波	函数名称即为该函数的标识符，例如 tri1。 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。 该函数有一个变元，它也可以进行平滑。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： tri1(x)

模板名称	变元和定义	语法示例
波形	函数名称即为该函数的标识符，例如 wv1。 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。 该函数有一个变元。它也可以进行平滑。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： wv1(x)
正态分布	函数名称即为该函数的标识符，例如 nd1。 定义正态分布的概率密度函数、累积分布函数和分位数函数。	函数名称后紧跟括号，括号中为单个变元。例如： nd1(x)、nd1_cum(x) 和 nd1_cum_inv(x)
随机	函数名称即为该函数的标识符，例如 rn1。 随机函数可以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。 该函数具有任意数量的变元。	函数名称后紧跟括号，括号中为逗号分隔的变元。例如： rn1(x,y) 变元 x 和 y 用作随机函数的随机种子。
外部 （仅全局定义）	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 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)。	函数名称后紧跟括号，括号中为相应数量的变元。例如： myextfunc(a,b)

模板名称	变元和定义	语法示例
MATLAB®（仅全局定义）	MATLAB® 函数对接一个或多个以 MATLAB® 语言编写的函数。此类函数可以用作 COMSOL Multiphysics® 中定义的其他任何函数，前提是需要安装 LiveLink™ for MATLAB® 和 MATLAB®。（MATLAB® 函数由 MATLAB® 在运行时计算。）	函数名称后紧跟括号，括号中为相应数量的变元。例如： `mymatlabfunc(a,b)`
高程	函数名称即为该函数的标识符，例如 `elev1`。 用于从数字高程模型导入地理空间高程数据，并将其映射到 x 和 y 的函数。DEM 文件包含地球表面一部分的高程数据。所得函数的特性本质上与基于网格的插值函数类似。	函数名称后紧跟括号，括号中为逗号分隔的变元。例如： `elev1(x,y)`
图像	函数名称即为该函数的标识符，例如 `im1`。 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。	函数名称后紧跟括号，括号中为逗号分隔的变元。例如： `im1(x,y)`
最小二乘拟合	函数名称即为该函数的标识符，例如 `lsq1_fun1`。 用于最小二乘函数逼近。定义一个或多个参数化函数相对于输入数据的最小二乘拟合。输入数据可以是文件、局部表或结果表。	函数名称后紧跟括号，括号中为逗号分隔的变元。例如： `lsq1_fun1(x1,x2)`

模板名称	变元和定义	语法示例
高斯过程	函数名称即为该函数的标识符，例如 gpm1。 用于多维插值。定义一个或多个通过高斯过程回归方法对输入数据进行训练的函数。输入数据可以是文件或结果表。 注：训练**高斯过程**函数需要使用“不确定性量化模块”。使用已包含训练过的**高斯过程**函数的模型不需要任何附加产品。	函数名称后紧跟括号，括号中为逗号分隔的变元。例如： gpm1(x1,x2)
函数 Switch	函数名称即为该函数的标识符，例如 sw1。 在求解器扫描过程中， Switch 用于在全局函数之间进行切换。您可以将此类函数作为子节点添加到 **Switch** 节点下。函数的 switch 本质上就像编程语言中的 switch 语句；也就是说，它根据可以使用**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。此外，您也可以在**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。	Switch 是函数的容器节点。

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，并能具有单位。

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，其中包含“模型开发器”和“App 开发器”中的整个模型树和 App 树。文件中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，这些对象可以直接导入模型树的**几何**或**网格**节点。请注意，如果使用了“CAD 导入模块”、“设计模块”或任一 CAD LiveLink™ 附加产品来创建几何模型，则可能需要相同的产品才能打开对应的文件，原因是该几何模型可能需要其中一款附加产品所独有的特征。

“物理场开发器”文件类型（扩展名为 `.mphphb`）包含可以从“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
COMSOL 二进制数据	`.mphbin`	是	是
物理场开发器	`.mphphb`	是	是
COMSOL 文本数据	`.mphtxt`	是	是

CAD

“CAD 导入模块”和“设计模块”支持导入一系列行业标准的 CAD 文件类型。其他文件类型可以通过 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）、STL（三维）、PLY（三维）和 3MF（三维）文件类型可以通过 COMSOL Multiphysics 导入，而无需任何附加产品。除非另有说明，否则在所有支持的 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®[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	是
IGES[1]	.iges,.igs	是	是
CATIA® V5[2,7]	.CATPart,.CATProduct	是	否
VRML, v1[8]	.vrml,.wrl	是	否
STL	.stl	是	是
3MF	.3mf	是	否

文件类型	扩展名	读	写
PLY	`.ply`	是	否

[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” ，或者以下任一款 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，并将其自动转换成三维 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
IPC-2581[1]	`.cvg,.xml`	是	否
ODB++[1]	`.zip,.tar,.tgz,.tar.gz`	是	否
GDS[1]	`.gds`	是	否
Touchstone[2]	`.s2p,.s3p,.s4p,...`	否	是
SPICE 电路网表 [3]	`.cir`	是	是

[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

您可以从模型树的**材料**节点中导入 MPH 文件格式和 COMSOL 原生 XML 格式的材料数据。此外，还可以导出 COMSOL 原生 XML 格式的材料数据。从 MPH 文件导入材料数据时，只需考虑文件的材料属性明细。如果要导出 MPH 文件格式的材料数据，您只需使用**文件**菜单中的选项来保存 MPH 文件。

“化学反应工程模块”和“等离子体模块”可以读取 CHEMKIN® 文件，从而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截面的 LXCAT 文件。“金属加工模块”可以从 JMatPro® 软件导入材料属性。

文件类型	扩展名	读	写
COMSOL 模型和 App	`.mph`	是	是
COMSOL 模型 XML	`.xml`	是	是
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
JMatPro®[4]	`.xml`	是	否

[1] 需要 “化学反应工程模块”或 “等离子体模块”，后者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。
[4] 需要 “金属加工模块”。

网格

NASTRAN® “模型数据”文件类型用于导入体网格。 VRML、 STL、 PLY 和 3MF 文件类型用于导入三角形表面网格，用户可以基于该网格来创建体网格。

文件类型	扩展名	读	写
3MF	`.3mf`	是	是
NASTRAN® 模型数据	`.nas,.bdf,.nastran,.dat`	是	是
PLY	`.ply`	是	是
COMSOL 分段	`.txt,.csv,.dat`	是	是
STL	`.stl`	是	是

文件类型	扩展名	读	写
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。此外，用户还可以读取这些图像，并将其用作物理场建模的插值函数。动画可以导出为以下文件类型之一：动画 GIF、 AVI 和 WebM。

文件类型	扩展名	读	写
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
glTF™	`.glb`	否	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	`.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文件（扩展名为 `.java`），以 Java® 代码的形式包含 COMSOL 命令序列。用户可以在文本编辑器中编辑这些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使用 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，以便同 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

您可以读取网格、分段和电子表格文件类型并将其用于定义插值函数。此外，也可以读取分段和电子表格文件类型用于定义插值曲线，并写入它们用于导出结果。不仅如此，您还能以电子表格格式复制粘贴表格。

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。

您可以读取数字高程模型 (DEM) 文件，并将其用作定义几何的参数化曲面。

文件类型	扩展名	读	写
复制粘贴电子表格格式	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™ 模块实现连接

下表显示 COMSOL 以及使用 LiveLink™ 附加产品链接的各种合作伙伴软件的启动选项。

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 [5]	是 [5]
LiveLink™ *for* Simulink®	否	是 [6]	否
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，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] 您可以使用 `system` 命令从 MATLAB® 会话启动 COMSOL Multiphysics Server，然后在 MATLAB® 命令提示符中使用 `mphstart` 进行连接。

[4]COMSOL Multiphysics with MATLAB® 桌面快捷方式可以依次启动 COMSOL Multiphysics Server 和 MATLAB®，并自动连接它们。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] 您可以在 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。

[6]COMSOL Multiphysics with Simulink® 桌面快捷方式可以启动 COMSOL Multiphysics Server 和 MATLAB®，并自动连接它们。然后，您可以启动 Simulink® 并添加 COMSOL Cosimulation 块，在其中加载协同仿真文件以运行协同仿真。