

COMSOL Multiphysics

简介

6.4

COMSOL

COMSOL Multiphysics 简介

© 1998–2025 COMSOL 版权所有

受列于 www.comsol.com/patents 的专利保护；您也可以从 COMSOL Desktop “文件”菜单的“帮助 > 关于 COMSOL Multiphysics”中获取适用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 6.4

联系信息

您可以访问“联系我们”页面 www.comsol.com/contact，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工单。有用的链接包括：

- 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/product-update
- 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
- 学习中心：www.comsol.com/support/learning-center

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

几何清理 44

材料 47

全局定义 49

物理场和边界条件 51

网格 59

研究 61

结果 62

收敛性分析 69

示例 2：母线板——多物理场模型 79

模型向导 82

全局定义 85

自动补全和查找工具 87

几何 89

材料 93

物理场和边界条件 100

网格 107

研究 110

结果. 111
使用 App 开发器构建 App 120
高级主题概述. 136
高级主题 137
参数、函数、变量和耦合. 137
材料属性和材料库. 142
添加网格. 144
添加物理场. 147
参数化扫描. 170
并行计算. 182
COMSOL Multiphysics 客户端–服务器. 186
使用模型管理器 189
创建本地数据库. 190
版本控制. 193
使用模型草稿. 200
比较版本. 207
排除已构建、计算并绘制的数据. 209
在数据库中导入辅助数据. 211
模型管理器工作区. 213
附录 A——构建几何 215
附录 B——键盘和鼠标快捷键 232
附录 C——语言元素和保留名称 240
附录 D——文件格式 257
附录 E——使用 LiveLink™ 模块实现连接 264

简介

在首次使用 COMSOL Multiphysics® 软件之前，请仔细阅读本书。本书将为您提供 COMSOL® 环境的全面介绍，并通过具体示例演示如何使用 COMSOL Desktop® 用户界面和“模型开发器”。同时，本书也将简要介绍如何使用“App 开发器”创建仿真 App 和插件，并对“模型管理器”的基本功能进行快速入门指导。

如果您尚未安装本软件，请立即访问 www.comsol.com/product-download，并根据页面中的操作说明完成安装。

除本书外，您在安装完成后还可以轻松获取丰富的文档资料。 COMSOL 网站上提供了大量教程资源，您可以访问“学习中心” www.comsol.com/support/learning-center、“视频中心” www.comsol.com/videos 以及“COMSOL 博客” www.comsol.com/blogs 页面进行学习。

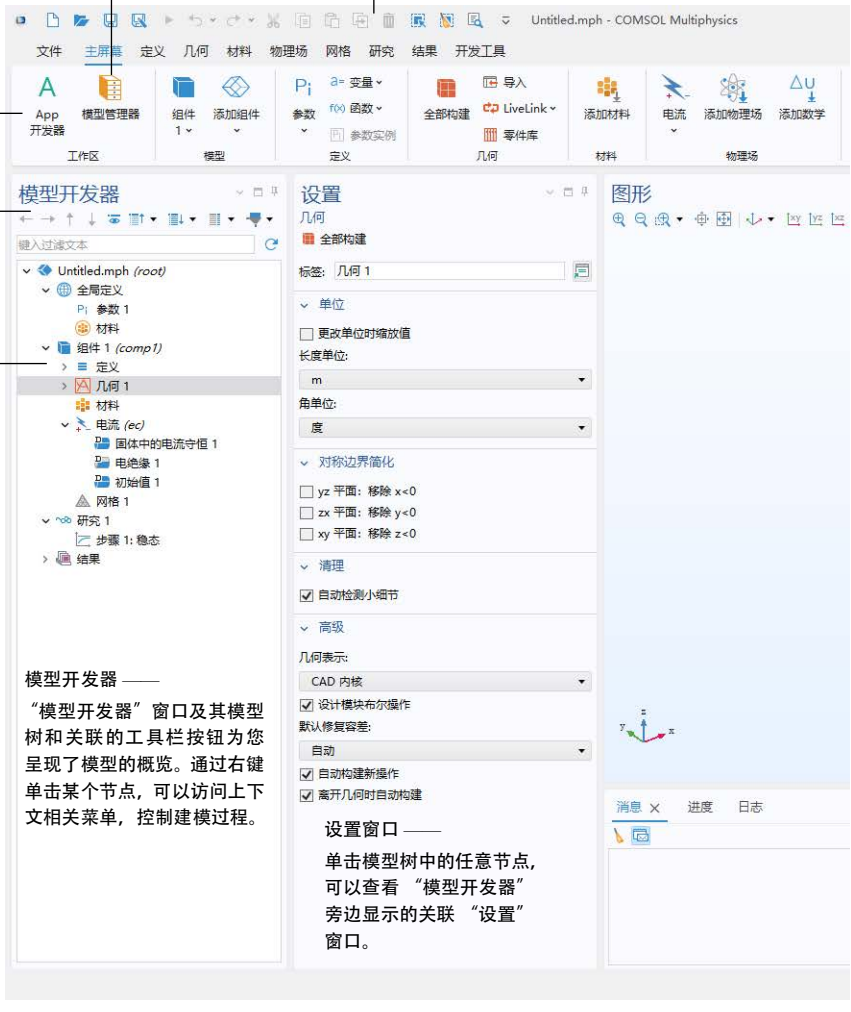
模型管理器 —— 单击此按钮可以切换到“模型管理器”，以管理模型的不同版本。

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 ——

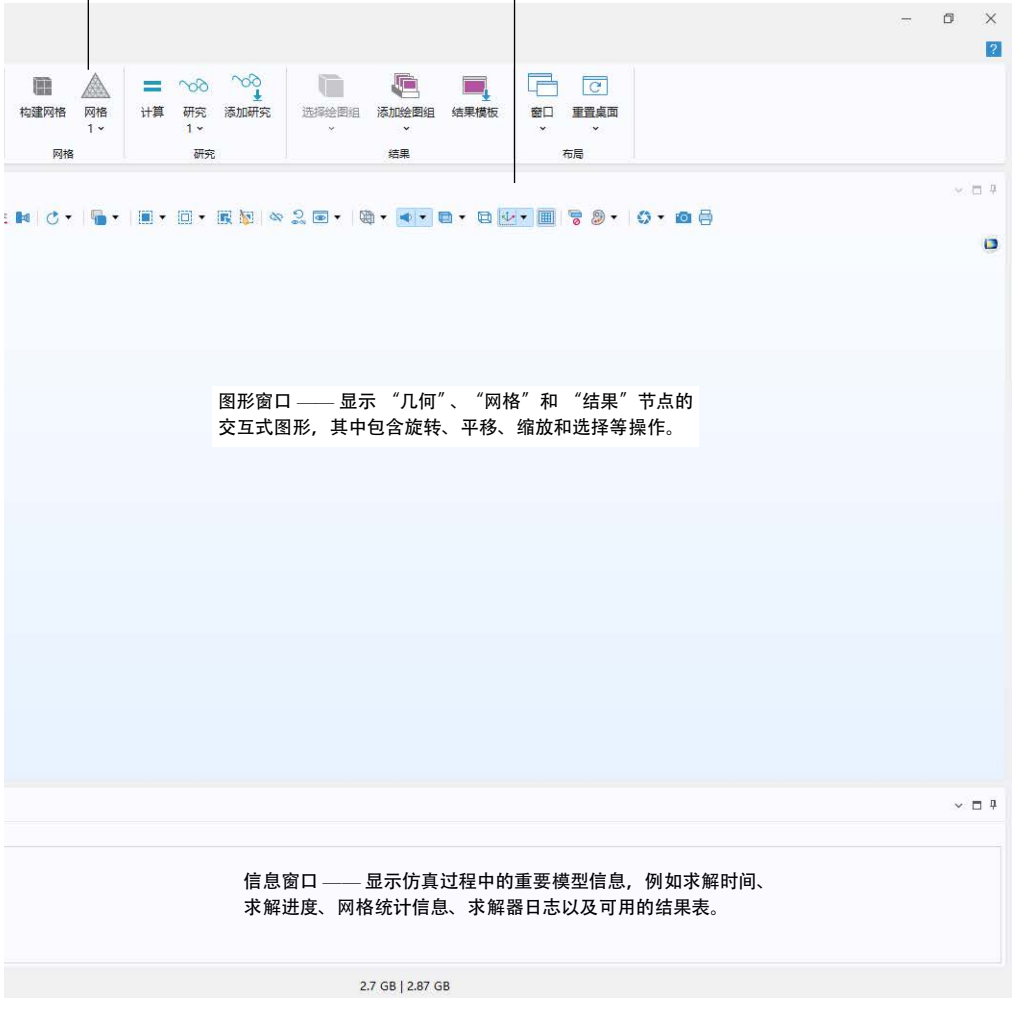
“模型开发器”窗口及其模型树和关联的工具栏按钮为您呈现了模型的概览。通过右键单击某个节点，可以访问上下文相关菜单，控制建模过程。

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 —— 功能区选项卡包含用于控制建模流程的所有步骤的按钮和下拉菜单。

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。

前页屏幕截图展示了您首次使用 COMSOL Multiphysics 的 “模型开发器”开始建模的初始用户界面。COMSOL Desktop® 用户界面为物理场建模、仿真及 App 设计提供了一个全面集成的一体化环境，内置了构建用户友好模型界面所需的全套工具。您可以根据需要定制桌面布局：对窗口进行调整大小、移动、停靠和分离等操作。您对布局所做的任何更改都会在关闭会话时自动保存，并在下次启动 COMSOL Multiphysics 时恢复。随着建模进程的推进，软件会添加相应的窗口和控件。（请参见第 28 页以查看更完整的桌面示例。）主要窗口和用户界面组件包括：

快速访问工具栏

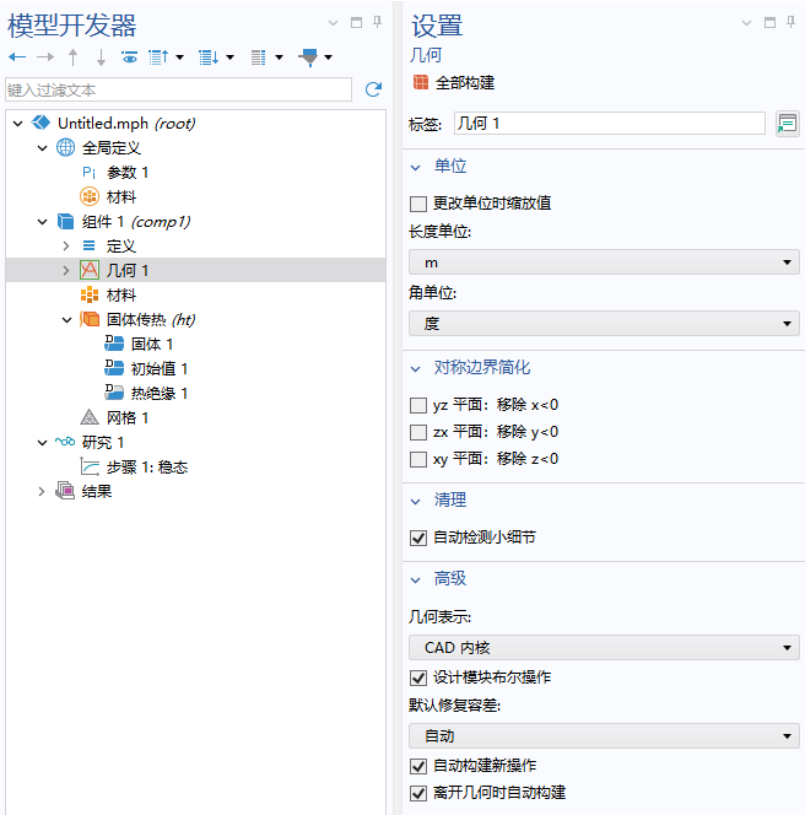
“快速访问工具栏”提供了诸如**打开**、**保存**、**撤消**、**重做**、**复制**、**粘贴**和**删除**等常用功能。您可以通过单击工具栏右侧的下拉箭头，对**定制快速访问工具栏**列表进行个性化设置。

功能区

桌面顶部的功能区汇集了完成大多数建模任务所需的命令。功能区仅在 Windows® 版的 COMSOL Desktop 环境中提供；在 macOS 和 Linux® 版本中，相应的功能通过菜单和工具栏来实现。单击 **App 开发器**按钮可从 “模型开发器”切换至 “App 开发器”，开始基于现有模型开发仿真 App。

设置窗口

这是用于输入所有模型设置参数的主窗口，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

这些窗口用于显示图形输出。除**图形**窗口外，**绘图**窗口主要用于对结果进行可视化。您可以使用多个**绘图**窗口同时显示多种结果。其中**收敛图**窗口是特殊类型，它是在模型运行期间自动生成的**绘图**窗口，以图形化方式展示求解过程的收敛情况。

信息窗口

这些窗口用于显示非图形信息。包括：

- **消息**：显示有关当前 COMSOL Multiphysics 会话的各种信息。

- **进度**：显示求解器的进度信息和停止按钮。
- **日志**：显示求解器信息，例如自由度数、求解时间和求解器迭代数据。
- **表格**：以表格形式呈现**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**下拉菜单访问所有 COMSOL Desktop 窗口。在 macOS 和 Linux® 系统上，这一功能位于**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。
- **结果模板**：添加与某个物理场接口关联的预定义绘图或计算；仅适用于特定的物理场接口。
- **从库中添加材料**和**材料浏览器**：访问材料属性库。
- **案例库**：汇集了 MPH 文件集合，涵盖教学模型和可运行的 App，并附有相应的配套文档，供您灵活选用。
- **零件库**：加载一个预定义的参数化几何模型。
- **插件库**：加载一个提供定制功能的插件。
- **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。
- **属性和注释**：查看模型树节点属性，也可以在此键入注释。
- **辅助数据**：查看与模型关联的辅助数据，例如插值文件或 CAD 文件。
- **消息**：显示执行操作后的相关信息。
- **表格**：以表格形式显示结果。
- **外部进程**：控制独立运行的 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，在模型的设置、标记、标签、表格等内容中进行查找。
- **版本**：显示存储在 “模型管理器”数据库中的模型版本。

- **智能助手**：用于与智能聊天助手进行交互的命令提示界面。
- **Java Shell**：用于交互式运行和调试代码的命令提示界面。
- **数据查看器**：检查和更改参数，以及查看 “App 开发器”声明和 Java 方法变量。
- **调试日志**：显示方法的调试信息。
- **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，仅当在**首选项**中激活“物理场开发器”时，此选项才可见。

带取消按钮的进度条

COMSOL Desktop 界面右下角设有带取消按钮的**进度条**，可用于取消当前正在进行的计算任务。

动态帮助

帮助窗口提供与窗口和模型树节点相关的上下文帮助文本。如果已在桌面中打开**帮助**窗口 （例如按 F1 键），则在单击任意树节点或窗口时，将显示对应的动态帮助 （仅英文版）。您可以在**帮助**窗口中搜索其他主题，例如菜单项。

模型开发器、 App 开发器和模型管理器

COMSOL Desktop 环境的核心组件包括“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”是用于定义模型及其组件的工具，涵盖求解方式设置、结果分析以及报告生成等功能。您可以通过构建模型树来完成这些操作。模型树反映了底层数据结构（即模型对象），其中存储了模型的所有状态信息，包括几何、网格、物理场、边界条件、研究、求解器、后处理和可视化设置。

APP 开发器

利用 “App 开发器”，您可以基于在 “模型开发器”中创建的模型来快速创建具有专业用户界面的仿真 App （简称 App），操作简便直观。“App 开发器”

提供了一系列重要的 App 开发工具，包括“表单编辑器”、“主窗口编辑器”和“方法编辑器”。“表单编辑器”支持拖放功能，可用于轻松调用输入框、图形窗口和按钮等用户界面组件。“主窗口编辑器”允许您添加带有按钮和菜单的功能区选项卡，并可通过子窗口灵活组织布局。“方法编辑器”是一个编程环境，可供您修改由模型对象数据结构表示的模型，也可用于为 App 添加用户界面逻辑和辅助功能。其中采用 Java® 编程语言编写代码，意味着您可以使用所有的 Java® 语法和库资源。

在“方法编辑器”中，程序代码存储在方法中。“方法”是其他编程语言中的子例程、函数或过程的另一种说法，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；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。有关“App 开发器”的快速入门介绍，请参阅第 120 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，支持您与其他用户协作，并集中组织模型和 App。“模型管理器”提供版本控制功能，用于跟踪文件的更改和更新历史，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”内置高级搜索工具，允许您根据关键字或标记，搜索存储在“模型管理器”数据库中的模型和 App。根据您的许可证类型，您可以连接到本地或远程集中管理的“模型管理器”数据库。有关“模型管理器”的快速入门介绍，请参阅第 189 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”的使用方法，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”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*。

Windows® 版 COMSOL Multiphysics 内置了“App 开发器”。只需拥有 COMSOL Multiphysics 许可证，即可在 COMSOL Desktop 环境中运行 App。尽管 macOS 或 Linux® 版本的软件无法构建 App，但仍可以在这些平台上通过 COMSOL Multiphysics 运行 App。

借助 COMSOL Compiler™，您可以将 App（MPH 文件）编译为可在 Windows®、Linux® 和 macOS 上运行的可执行文件，并将其自由分发给其他人使用，他们无需任何许可证文件即可运行这种可执行文件。

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，您还可以通过易于安装的 Windows® 版 COMSOL Client 连接至 COMSOL Server 来运行 App。

Windows® 版 COMSOL Client 支持运行需要 CAD LiveLink™ 产品的 App（此功能在网页浏览器中运行 App 时不可用）。

通过网页浏览器运行 App 无需安装任何软件或插件，并支持一维、二维和三维交互式图形显示；其中三维图形渲染基于主流网页浏览器内置的 WebGL™ 技术实现。

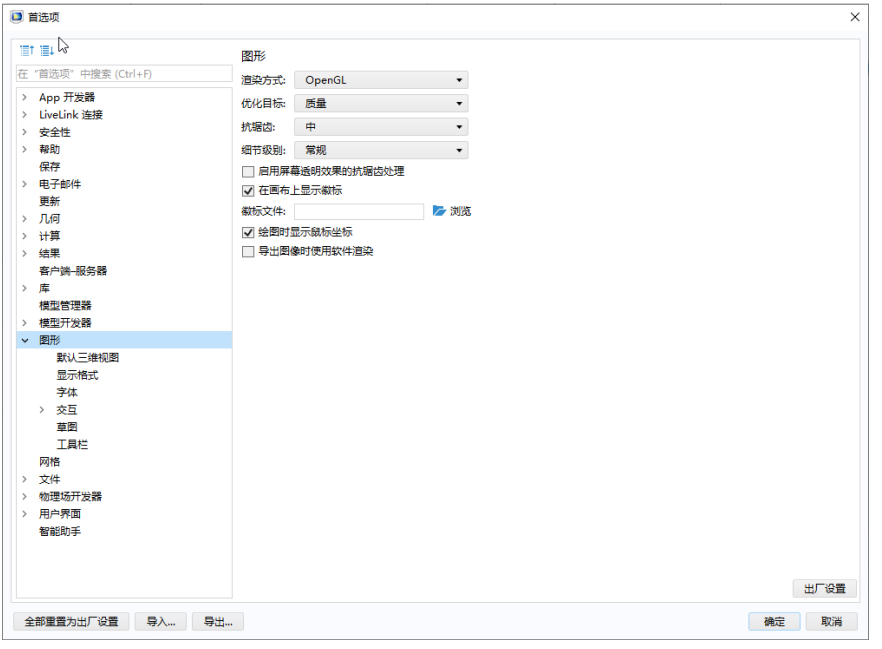
要基于模型创建 App，可以单击功能区**主屏幕**选项卡上的 **App 开发器**按钮。



有关创建 COMSOL 仿真 App 的更多信息，请参阅第 120 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”是影响建模环境的设置项。大部分设置在建模会话之间保持一致，但有些设置会随模型一起保存。您可以从**文件**菜单中选择**首选项**来访问这些设置。



在**首选项**窗口中，您可以更改图形渲染方式、结果数据显示位数、计算所用的最大 CPU 内核数或用户定义的 App 库路径等设置。建议您花一些时间浏览当前设置，以熟悉各种不同的选项。

图形和绘图窗口

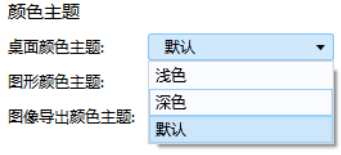
图形页面提供两个图形渲染选项：**OpenGL**® 和**软件渲染**。如果您的计算机未配备独立显卡，则可能需要切换至**软件渲染**，此时图形显示速度稍慢但功能齐全。请访问以下链接，获取建议的显卡列表：

www.comsol.com/system-requirements

颜色主题

用户界面 > **颜色主题**页面提供三种颜色主题首选项：

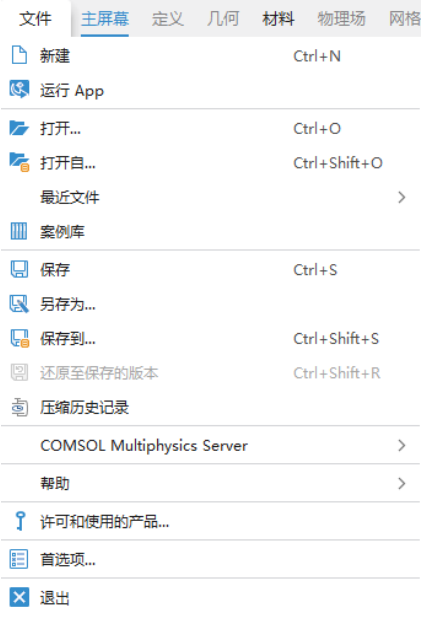
- **桌面颜色主题**：为 COMSOL Desktop 环境选择**默认**、**浅色**或**深色**主题。
- **图形颜色主题**：为**图形**窗口选择一种颜色主题。
- **图像导出颜色主题**：为导出的图像选择一种颜色主题。



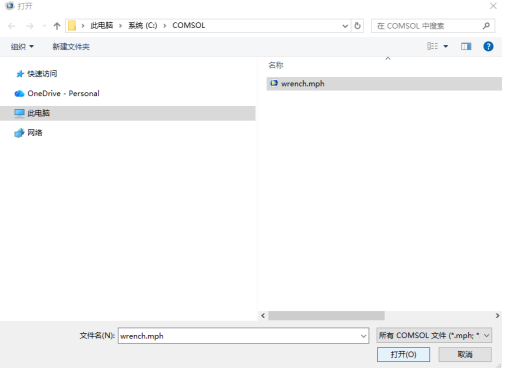
在 Linux® 中使用**深色**主题时，部分控件的颜色将继承自操作系统主题。为了提升用户体验，建议您在 Linux® 中选择深色外观主题，并在 COMSOL Desktop 环境中选用**深色**主题。

在文件菜单中打开和保存文件

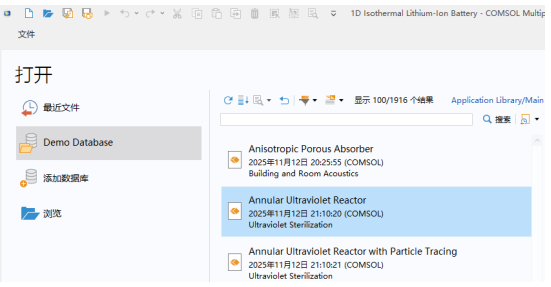
文件菜单提供多个选项，用于以 COMSOL MPH 文件格式和其他一些支持的格式打开和保存模型文件。



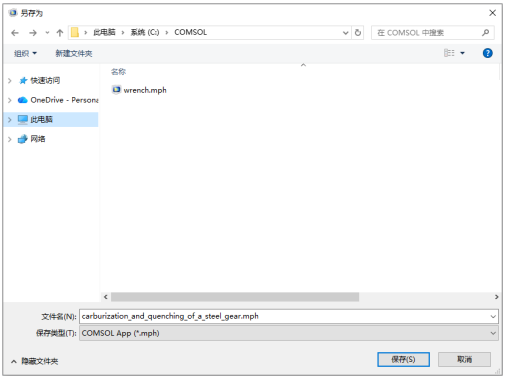
- **新建**：从头开始创建新模型。
- **运行 App**：如果所选的 MPH 文件中存在可运行的 App 定义，则打开并运行该 App。
- **打开**：使用**打开**对话框从文件系统中打开现有的文件。



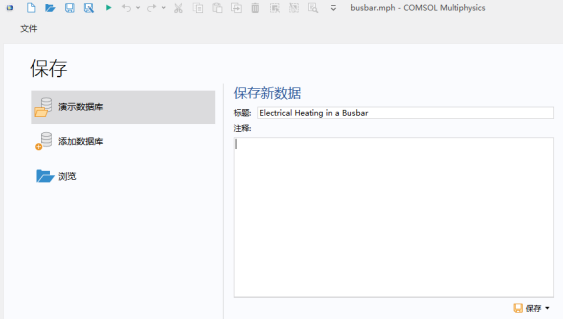
- **打开自**：从文件系统或“模型管理器”数据库中打开现有的文件（请参见第 189 页的“使用模型管理器”）。
- **最近打开的文件**：从文件系统或“模型管理器”数据库中打开一个最近打开的文件。



- **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。

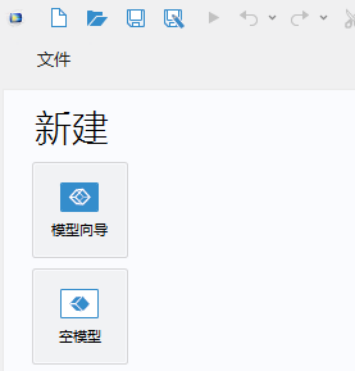


- **保存到**：可以保存到“模型管理器”数据库。



- **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。

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

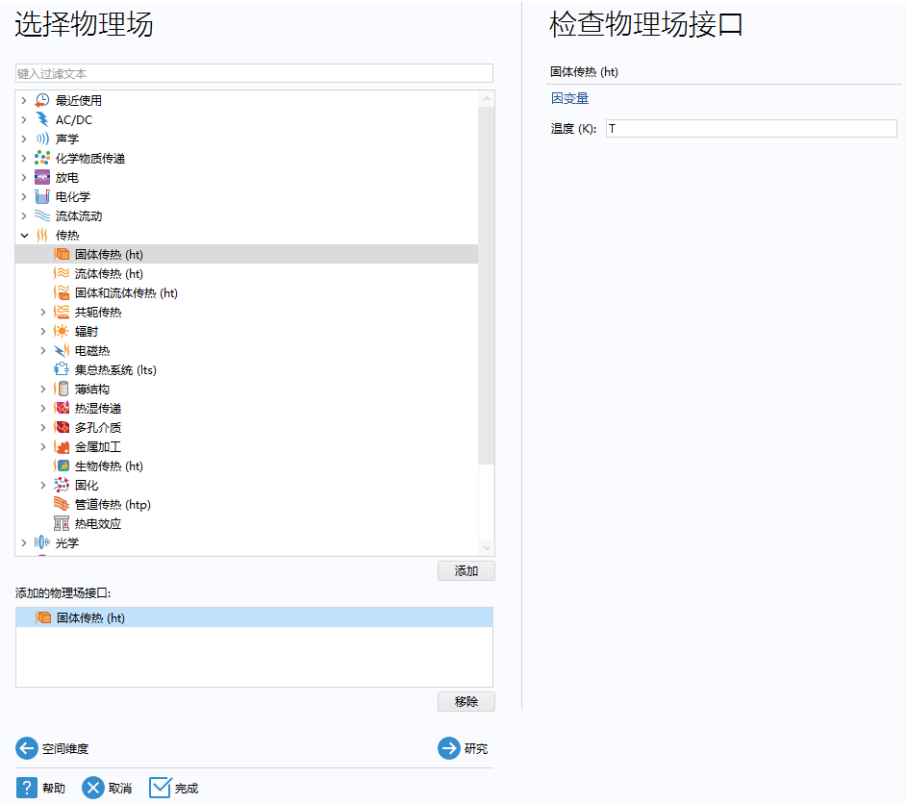
“模型向导”将引导您设置空间维度、物理场和研究类型，步骤如下：

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 接下来，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，方便您轻松进行查找。这些分支并不直接与产品模块相对应，当您在

COMSOL Multiphysics 安装过程中添加产品模块时，一个或多个分支下会自动添加额外的物理场接口。



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

空模型选项将打开一个没有任何**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，并为每个建模步骤提供了可用的功能概览，包括基于模型开发仿真 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**和**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。以**工作平面**模式选项卡为例，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，工具栏取代了功能区来提供这些功能。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。

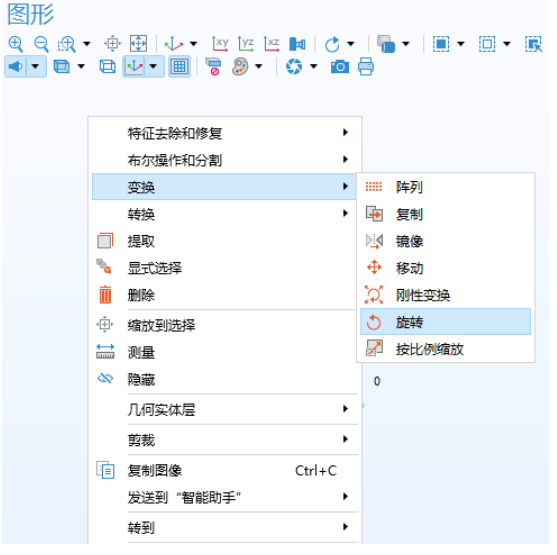
快速访问工具栏

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。此外，还可以选择将**快速访问工具栏**放置在功能区的上方或下方。



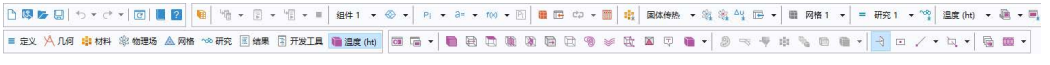
图形菜单

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，即可访问与当前选择的模型树节点相关的上下文菜单。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。尽管如此，在 macOS 和 Linux® 系统上， COMSOL Multiphysics 和 COMSOL Desktop 环境的运行方式也极为相似；您只需在相应的菜单和工具栏中找到功能区的用户界面组件即可。此外，虽然仅 Windows® 版本支持 “App 开发器”，但您依然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

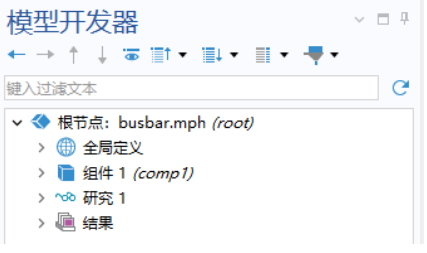
使用 “模型开发器”时，可通过以下操作开始构建模型：在默认的模型树中添加节点并编辑节点设置。

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在其中添加的子节点的列表，这是在模型树中添加节点的方法。

当您单击某个子节点时，可以在**设置**窗口中查看并编辑其节点设置。

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 F1 功能键），则在单击节点时，还可以获取动态帮助信息。

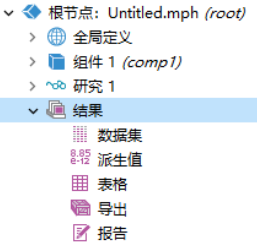
根节点、全局定义和结果节点



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、默认单位制等信息。

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、函数及耦合关系等。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**节点本身不包含任何设置，但其子节点则包含丰富的设置选项。**材料**子节点用于存储材料属性，以便在模型的各个**组件**节点中进行引用。

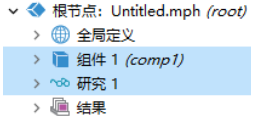
结果节点用于访问仿真执行后得到的解，其中还提供多个数据处理工具。初始状态下，**结果**节点包含五个子节点：



- **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。

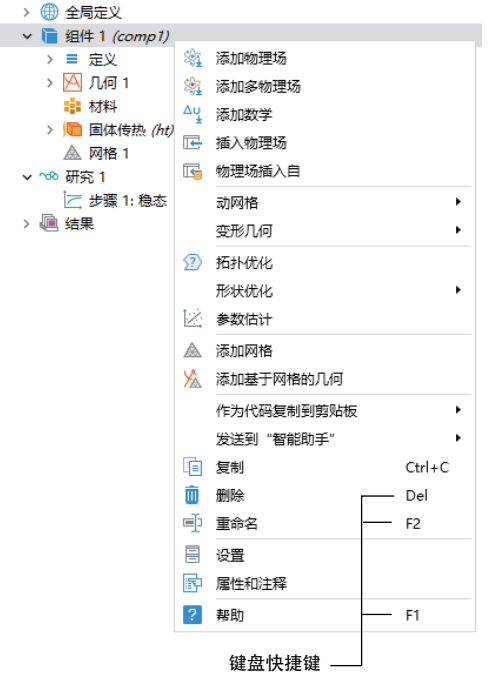
除了默认的五个子节点外，您还可以添加更多**绘图组**子节点，用于定义要在**图形**或**绘图**窗口中显示的图形。其中一些节点可根据所执行的仿真类型自动创建；您也可以通过右键单击**结果**节点并从绘图类型列表中进行选择来包含其他图形。不仅如此，您还可以添加**计算组**节点 （与**派生值**节点相似，但具有紧密关联的**计算组**表）和**参数**节点 （用于**结果**中专用的参数）。

组件和研究节点



除了前文提到的三个节点外，系统还提供两种顶层节点类型：**组件**和**研究**节点。这两种节点通常在您使用 “模型向导”创建新模型时自动生成。通过 “模型向导”，您可以指定要模拟的物理场类型以及要运行的**研究**类型 （例如稳态、瞬态、频域或特征频率分析），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。为了避免这种情况，您可以根据这些节点类型各自的用途对其重新命名。



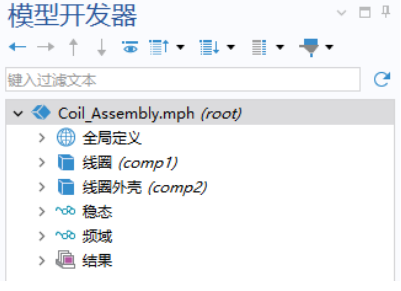
如果模型包含多个**组件**节点，可以将它们相互耦合，以构建一系列更为复杂的仿真步骤。

请注意，每个**研究**节点都能执行不同类型的计算，因此每个节点都配备了单独的**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：一个用于模拟线圈，另一个用于模拟线圈外壳。接着，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分别重命名为**稳态**和**频域**。

完成模型构建后，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`，表示保存模型所用的文件名。**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，它们分别使用了前面段落中选择的名称。



参数、变量和作用域

全局参数

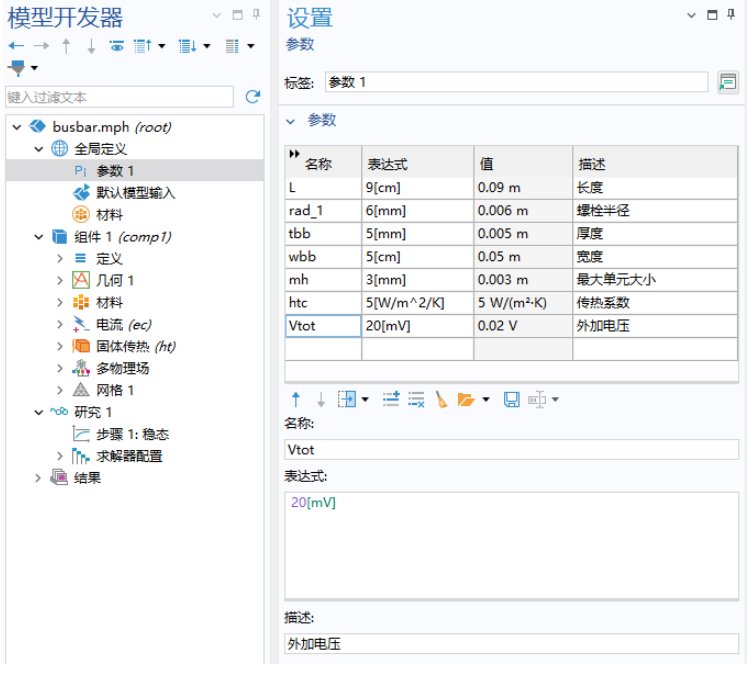
全局参数是用户定义的常量标量，可以在整个模型中使用。也就是说，这些参数具有“全局”性质，其重要用途包括：

- 参数化几何尺寸。
- 指定网格单元大小。
- 定义参数化扫描（使用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、以全局参数表达式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 240 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`、`z` 等空间变量或方程求解的因变量。

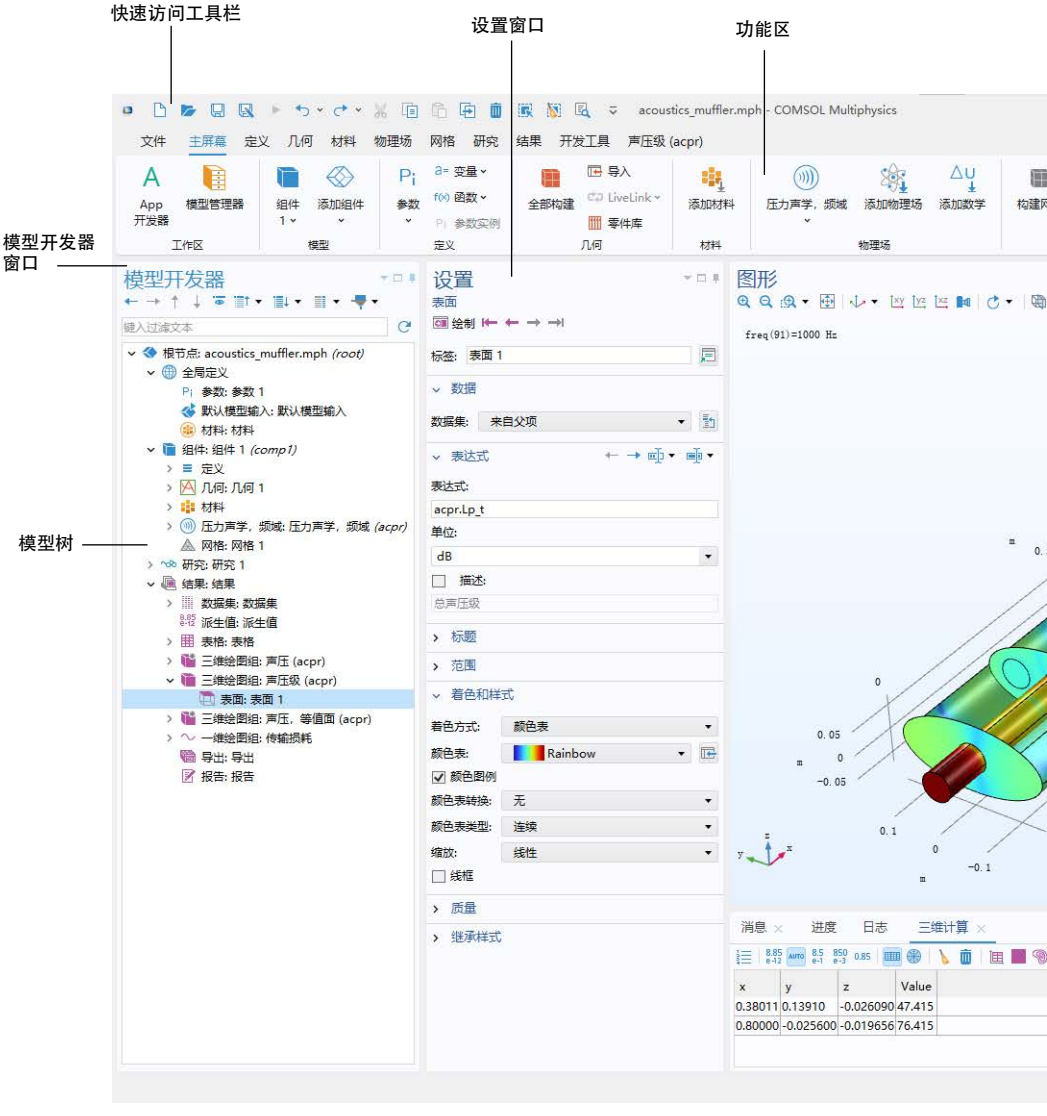
请注意，参数名称区分大小写。

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。



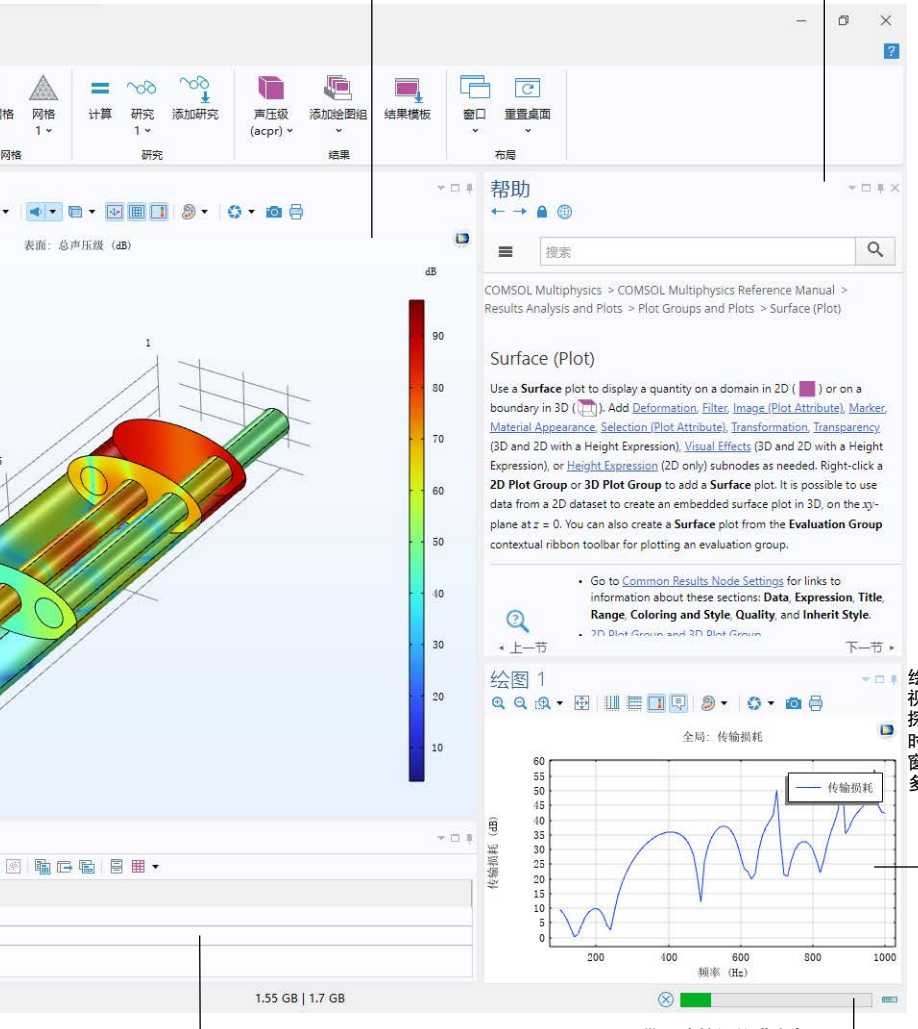
请注意，您可以添加多个**参数**节点，系统会依次将其命名为**参数 1**、**参数 2**，以此类推。同时，您还可以将**参数**组织到多个实例中，然后进行参数化扫描。有关更多信息，请参见第 170 页的 “参数化扫描”。

以下跨页图片显示了一个包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
acoustics_muffler.mph - COMSOL Multiphysics
文件
主屏幕
定义
几何
材料
物理场
网格
研究
结果
开发工具
声压级 (acpr)
App 开发器
模型管理器
组件 1
添加组件
参数
变量
函数
参数实例
全部构建
导入
LiveLink
零件库
添加材料
压力声学，频域
添加物理场
添加数学
工作区
模型
定义
几何
材料
物理场
模型开发器
键入过滤文本
根节点: acoustics_muffler.mph (root)
全局定义
参数: 参数 1
默认模型输入: 默认模型输入
材料: 材料
组件: 组件 1 (comp1)
定义
几何: 几何 1
材料
压力声学，频域: 压力声学，频域 (acpr)
网格: 网格 1
研究: 研究 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: 声压 (acpr)
三维绘图组: 声压级 (acpr)
表面: 表面 1
三维绘图组: 声压，等值面 (acpr)
一维绘图组: 传输损耗
导出: 导出
报告: 报告
设置
表面
绘制
标签: 表面 1
数据
数据集: 来自父项
表达式
表达式:
acpr.Lp_t
单位:
dB
描述:
总声压级
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
缩放: 线性
线框
质量
继承样式
图形
freq(91)=1000 Hz
消息
进度
日志
三维计算
x
y
z
Value
0.38011
0.13910
-0.026090
47.415
0.80000
-0.025600
-0.019656
76.415

图形窗口

动态帮助—— 持续更新，可在线访问“知识库”和“案例下载”页面。“帮助”窗口支持便捷浏览，并提供扩展的搜索功能。



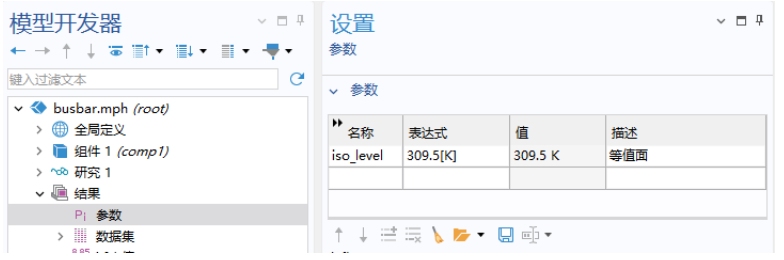
绘图窗口—— 用于可视化“结果”物理量、探针和收敛图。可同时启用多个 “绘图”窗口，以便并行展示多个仿真结果。

信息窗口

带取消按钮的进度条

结果参数

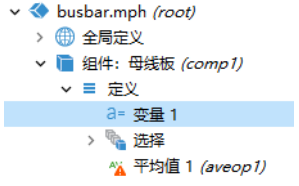
为了获得更高的灵活性，您可以定义仅在**结果**节点中使用的参数，使用这些参数时无需重新求解模型。



结果参数可能与其他参数和内置函数相关。

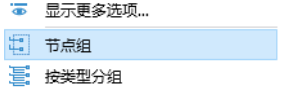
变量

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，在整个模型树中可用），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，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。您可以通过右键单击**定义**节点来访问此菜单。



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 中使用的变量

您可以在 App 中使用模型参数和变量，例如，可以允许 App 用户更改参数的值。此外，还可以在“App 开发器”的 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。

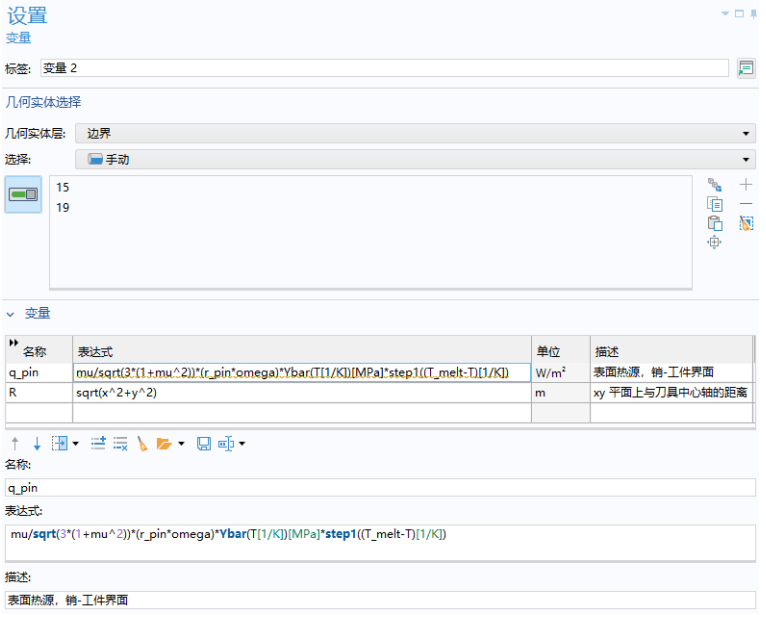
作用域

参数或变量的“作用域”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，这表明它们具有全局作用域，可以在整个模型树中使用。

变量同样可以在**全局定义**节点中定义为**变量**子节点，这些变量也具有全局作用域，但受到一些其他限制。例如，它们不能用于**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则具有局部作用域，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，需要将变量的作用域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，其作用域仅限于编号 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本应具有局部作用域，但只要足够明确地指定其标识，这些变量仍然可以在模型树的**组件**节点之外进行访问。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，但在 “模型开发器” 中则不可用。

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，这些名称是保留的，用户不得重新定义。如果您对用户定义的变量、参数或函数使用保留名称 （软件已使用的名称），则输入的文本会以黄色波浪下划线 （表示警告）或红色波浪下划线 （表示错误）显示，如果将光标悬停在文本字符串上方，您将收到一条工具提示消息。

以下是一些重要示例：

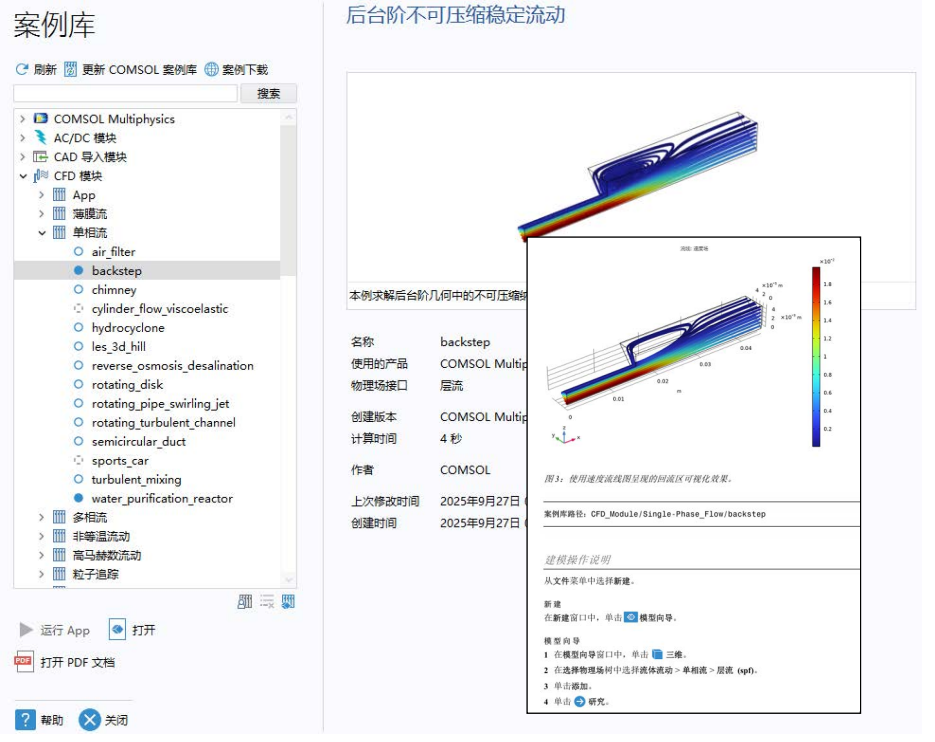
- 虚部单位 `i` 或 `j`、**数学常数，如** `pi` (3.14...)
- 物理常数，如 `g_const` （重力加速度）、 `c_const` （光速）或 `R_const` （通用气体常数）
- 时间变量， `t`
- 因变量 （解）的一阶和二阶导数，其名称派生自空间坐标名称和因变量名称 （用户定义的变量）
- 数学函数，如 `cos`、 `sin`、 `exp`、 `log`、 `log10` 和 `sqrt`

有关更多信息，请参见第 240 页的 “附录 C—— 语言元素和保留名称”。

案例库

“案例库”汇集了 MPH 文件集合，涵盖教学模型与可直接运行的 App，并附有相应的文档。其中的教学模型演示如何使用 “模型开发器”，而随附的文档则提供了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。您可以轻松查看和编辑所有教学模型和 App，并根据您的个性化需求进行定制。每个基于物理场的附加模块都配有专属案例库，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 文件作为建模的参考模板。

您可以通过两种方式打开**案例库**窗口：一是从**主屏幕**工具栏的**窗口**菜单中选择**案例库**，二是从**文件**菜单中选择。打开后，您可以根据 App 名称进行搜索，或在相应的模块文件夹名称下进行浏览。



单击**打开**、**运行 App** 或**打开 PDF 文档**。您也可以从**文件**菜单中选择**帮助 > 文档**，按 App 名称进行搜索或按模块浏览。请注意，**运行 App** 选项仅适用于可运行的 App （MPH 文件）。

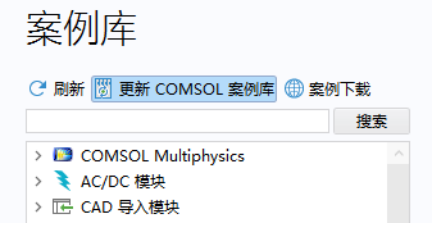
“案例库”中的 MPH 文件分为三种格式 —— “已求解”的 MPH 文件、“未求解”的精简 MPH 文件或 “预览” MPH 文件：

- “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，当光标悬停在 “案例库”树中的模型节点上时，会显示**大文件**文本提示及文件大小信息。
- “未求解”的精简 MPH 文件保留全部模型设置，但为节省安装空间，不含内置网格和解数据。某些 MPH 文件由于计算时间短、结果易重新生成等原因，亦可能不含解数据。您可以打开这些文件来研究其设置、进行网格划分

并重新求解。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）。此类文件在“案例库”窗口中以 ◯ 图标显示。如果您将光标悬停在**案例库**窗口中未求解的文件上，系统会显示一条消息，提示**未存储解**。除少数作为常规模型模板的情况外，均可通过“案例库更新”下载已求解的版本。

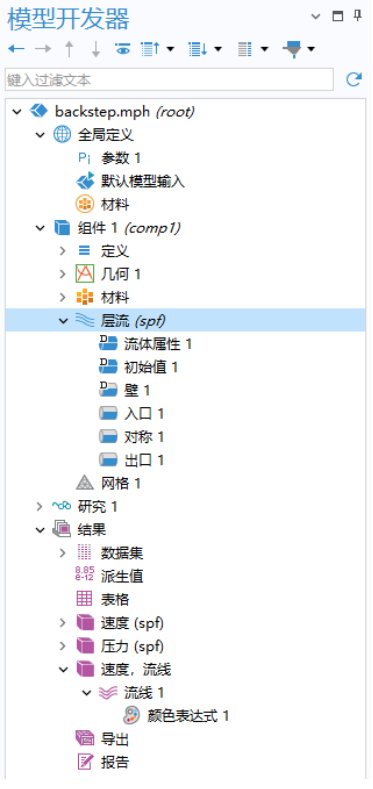
- “预览” MPH 文件只包含模型描述和缩略图。此类文件在**案例库**窗口中以 ◌ 图标显示。作为 App 或模型文件的预览文件，其中包含模型描述以及有关所用产品、物理场接口和计算时间的信息。您可以据此决定下载已求解或未求解的版本。如果您已指定使用在线帮助功能（请参阅 *Reference Manual* 获取相关操作的详细信息），还可获取相应的模型文档。

COMSOL 会定期更新“案例库”。如需检查所有可用更新，可以单击**案例库**窗口顶部的**更新 COMSOL 案例库** 。也可以通过**文件** > **帮助**菜单（Windows® 用户）或直接从**帮助**菜单（macOS 和 Linux® 用户）找到此选项。通过这一操作，可以连接到 COMSOL 网站，您可以在此获取新的 App 以及最新的更新内容。



如果计算机已接入互联网，您只需单击**案例下载**按钮，即可访问 COMSOL 网站，获取更多丰富的示例资源。

在**模型开发器**窗口，从定义全局变量开始，直至最终生成结果报告，建模过程中的每一步都在模型树中清晰呈现。



模型树自顶向下依次定义了一个有序的操作序列。

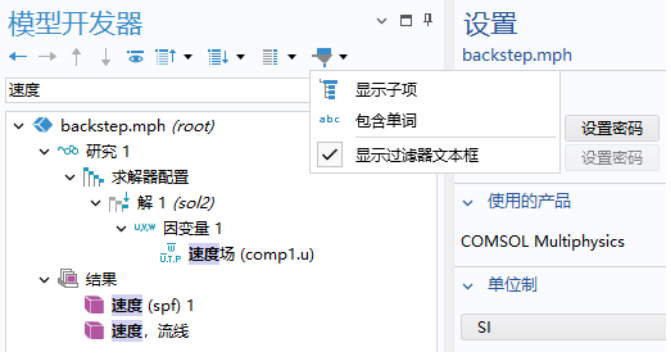
在模型树的以下分支中，节点顺序会影响操作序列，您可以在模型树中上下移动子节点来更改操作序列：

- **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，以便更清晰地查看，例如，**全局定义**的子节点即可进行此类调整。您可以使用模型树上方的过滤文本框，仅显示与所输入搜索字符串匹配的节点。此外，通过“模型开发器”工具栏中的**过滤器选项**菜单，可对搜索结果进行更多调整设置。



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**，可以查看模型树中以程序代码语句呈现的操作序列。请注意，模型历史记录将完整保留您在构建模型过程中的所有更改记录。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冗余的更改信息，只保留一个包含最终建模步骤的最新副本。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。

在使用 COMSOL Desktop 界面和“模型开发器”的过程中，您会逐渐体会到这一有序又简便的方法所带来的诸多优势。然而，任何关于用户界面的描述都不如您亲自动手实践来得直观。在接下来的章节中，我们将引导您着手完成两个仿真示例，助您更深入地掌握软件的使用。

示例 1：扳手结构分析

这是一个极易上手的示例，您无需安装 COMSOL Multiphysics® 的任何附加产品即可直接运行。如需探索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。

在日常生活中，您可能会使用扳手来拧紧螺栓。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。

扳手通常采用钢这种延性材料来制造。如果作用扭矩过大，扭力一旦超过其屈服应力水平，扳手就会因钢的弹塑性特性而产生永久变形。为了分析扳手的手柄尺寸是否合适，可以通过检查机械应力水平是否处于屈服应力的极限范围内来进行评估。

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。接着导入几何，并选择 steel 作为材料。然后，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，通过数值分析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，请先阅读本节内容，以掌握一些关键特征，然后再学习第 79 页的 “示例 2：母线板 —— 多物理场模型”教程。

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**。



“模型向导”将引导您完成建立模型的最初几个步骤。您可以在随后出现的窗口中选择建模空间的维度。

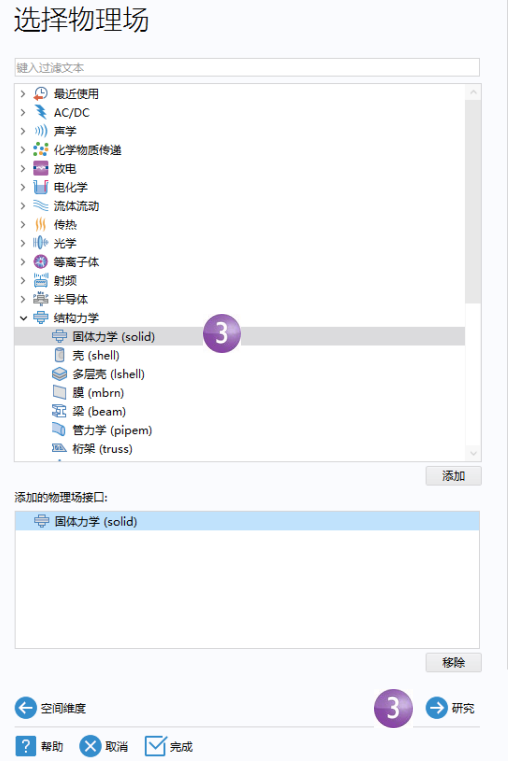
2 在**选择空间维度**窗口中选择“三维”。



3 在**选择物理场**窗口中选择**结构力学 > 固体力学 (solid)** 。单击**添加**。

即使没有附加模块，**结构力学**文件夹中也包含**固体力学**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——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

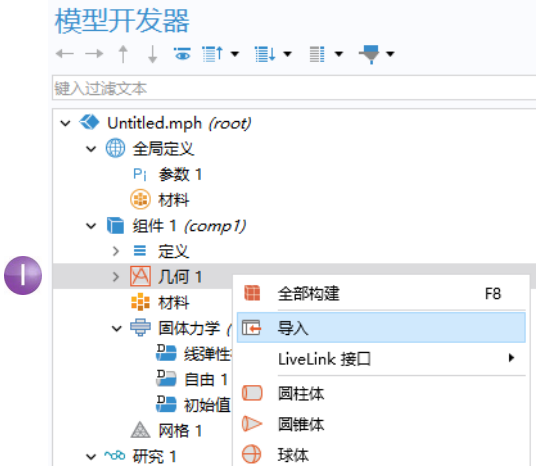
本教程使用之前创建并存储为 COMSOL 原生 CAD 格式 `.mphbin` 的几何。如需了解如何构建您自己的几何，请参见第 215 页的 “附录 A—— 构建几何”。

“案例库”中包含本练习所用文件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，文件路径一般如下：

```
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL64\Multiphysics\applications
```

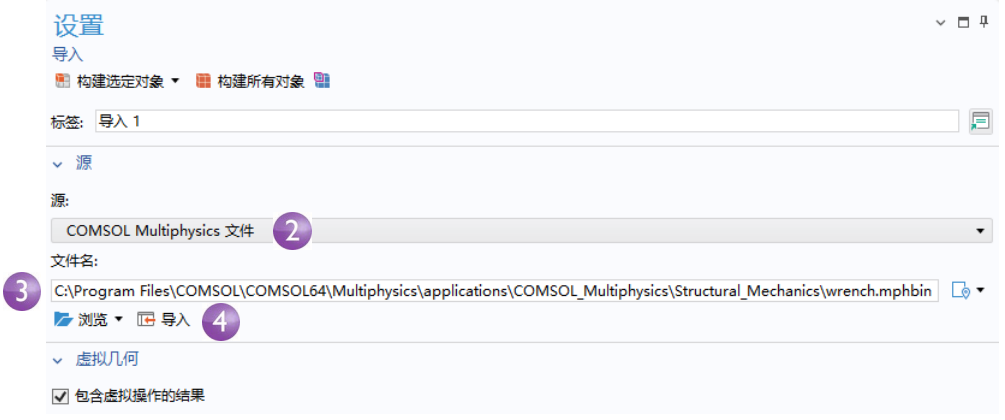
接下来，按照以下步骤导入现成的几何文件。

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）。



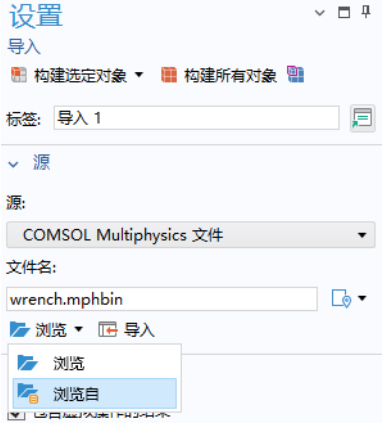
3 单击**浏览**，并在 COMSOL 安装文件夹的 application 库文件夹中找到 `wrench.mphbin` 文件。在 Windows® 系统中，默认位置为：

```
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL64\Multiphysics\applications\
COMSOL_Multiphysics\Structural_Mechanics\wrench.mphbin
```

双击进行添加，或单击**打开**。

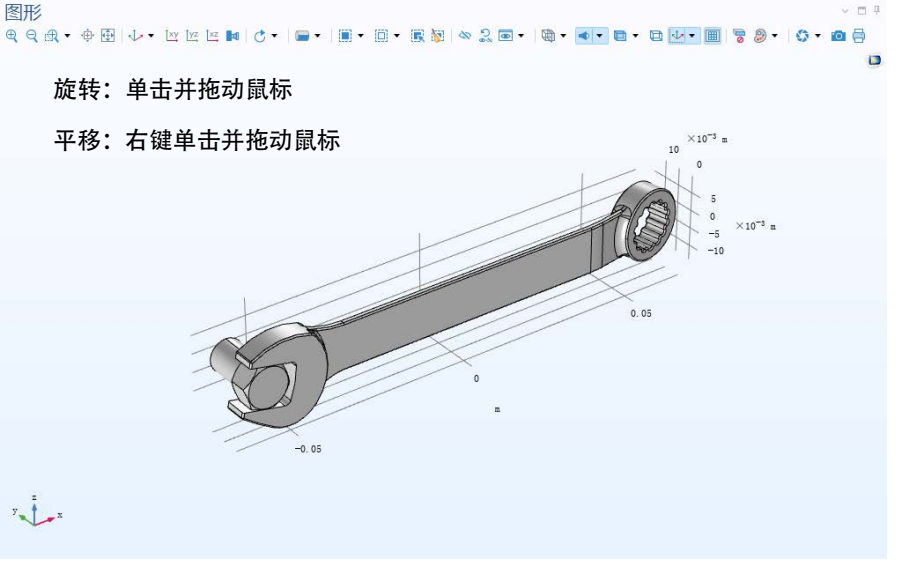
4 单击**导入**。此时，**图形**窗口中会显示导入的几何。

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，其颜色会发生变化。单击**图形**窗口工具栏中的**放大** 、**缩小** 、**切换到默认三维视图** 、**缩放到窗口大小** 和**透明度** 按钮，观察几何的变化：

- 要旋转几何，只需在**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，然后拖动。
- 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。



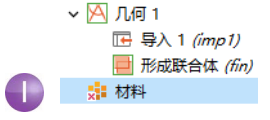
有关附加信息，另请参见第 232 页的 “附录 B—— 键盘和鼠标快捷键”。

导入的模型包含两个部分 （域），分别对应于螺栓和扳手。本练习将集中分析扳手中的应力情况。

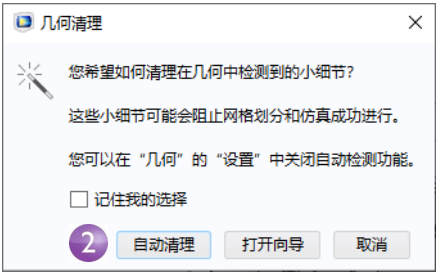
几何清理

接下来，需要定义材料属性。在此之前，必须确保几何已经为分析做好准备。当您单击**几何**节点下的某个节点时，这一准备过程会自动完成。清理过程会移除如薄间隙、窄表面以及短边等不必要的几何细节，这样做是为了避免这些细节因要求过于细化的网格而妨碍分析的进行。

1 单击**材料**节点。



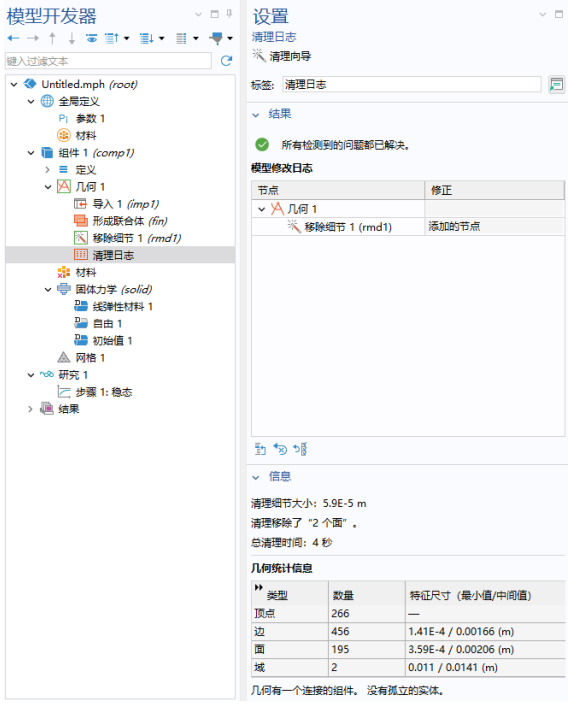
此时会打开**几何清理**对话框。



打开向导选项会逐步引导您完成清理过程，但在本例中，自动选项已经足够。

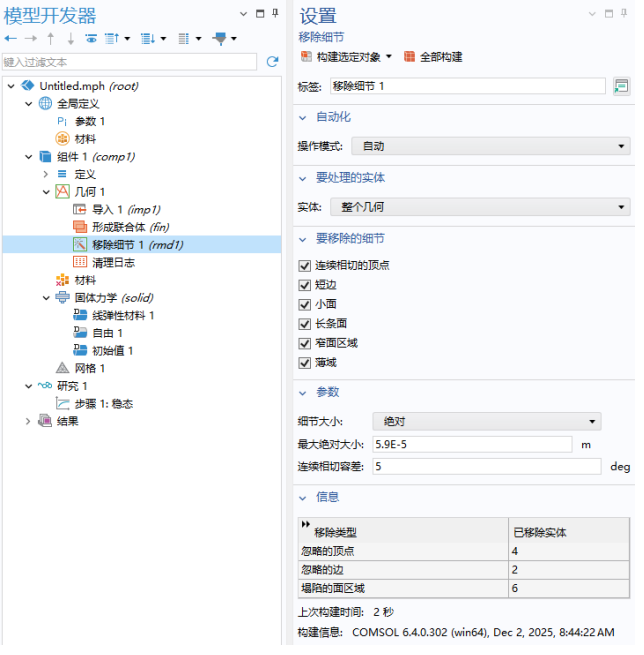
2 单击**自动清理**按钮。

几秒钟后，将显示**清理日志**窗口。



清理日志窗口提供了清理是否成功、应用的具体操作以及与几何模型相关的其他细节的相关信息。清理过程在**几何**序列中添加了**移除细节**节点。

在**移除细节**窗口中，您可以查看被移除的特征。在本案例中，忽略了 2 个顶点，并塌陷了 6 个面区域。这些操作不仅可以提高网格质量，还能减少单元数，从而提高计算效率。

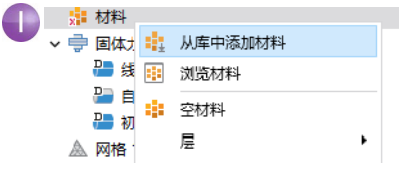


材料节点 用于存储**组件**节点中所有物理场和域的材料属性。我们需要为螺栓和工具使用同一种通用钢材料，可通过以下步骤在“模型开发器”中选择材料。

1 打开**添加材料**窗口。

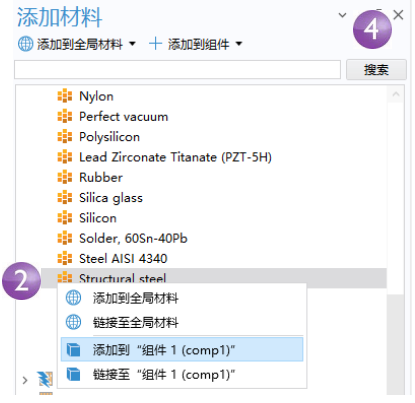
您可以通过以下两种方式来打开**添加材料**窗口：

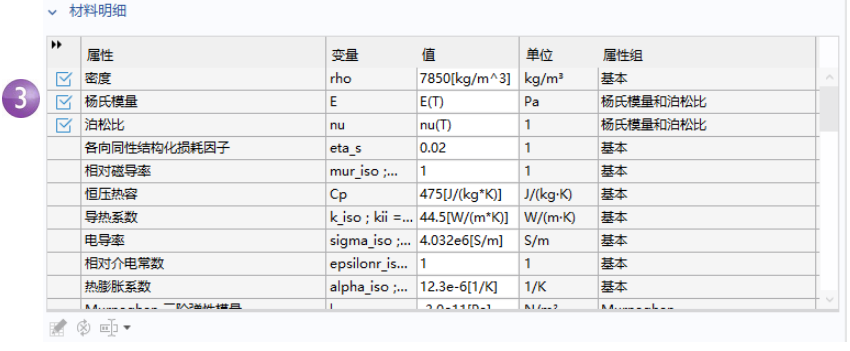
- 在**模型开发器**窗口中，右键单击**组件 1** > **材料** ，并选择**从库中添加材料** 。
- 从功能区中选择**主屏幕**选项卡，然后单击**添加材料**。



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。

请注意，某些属性可以用作温度 T 的函数。如果模型中未定义传热物理场，则该温度将采用**全局定义**下的**默认模型输入**中的值。

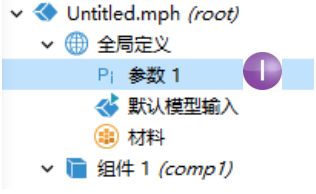
如需了解有关材料使用的更多信息，请参见母线板教程章节：第 93 页的“材料”和第 142 页的 “定制材料”。

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。

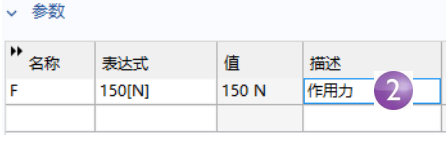
参数

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数值与物理单位关联起来；在本例中，力的单位是牛顿。在您离开编辑框或按 Enter 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 85 页的 “全局定义”和第 137 页的 “参数、函数、变量与耦合”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的步骤。此时，**模型开发器**中的节点序列应与右图一致。**固体力学**下的默认特征节点通过节点图标 左上角的 **D** 来标识。



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**节点是一种边界条件，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（本例中不适用）。

您无法移除默认的物理场节点，但可以通过添加额外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或补充默认节点和其他节点的设置。有关更多信息，请参见第 154 页的 “替代与贡献：独占和贡献节点”。

您可以随时保存模型，并在后续重新打开时完全恢复到保存时的状态。

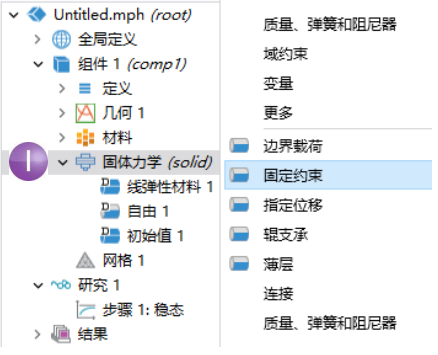
3 从**文件**菜单中选择**另存为**。浏览到您拥有写权限的文件夹，将文件另存为 `wrench.mph`。

定义几何与材料后，即可开始设置边界条件。

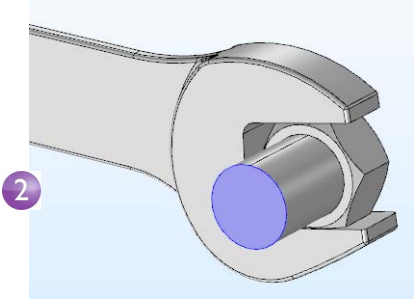
1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**固定约束** 。

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**。



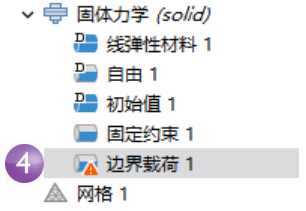
2 在**图形**窗口中，通过单击窗口中的任意位置并将扳手拖动到如图所示的位置，即可旋转几何。单击部分建模螺栓暴露的前表面，该边界变成蓝色时，表明已被选中。此时，**选择**列表中的**边界编号**应为 **35**。



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。

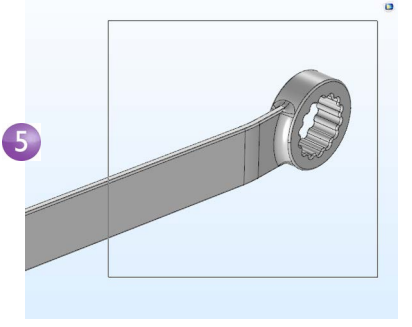


4 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**边界载荷**，可将**边界载荷**节点 添加到**模型开发器**序列中。

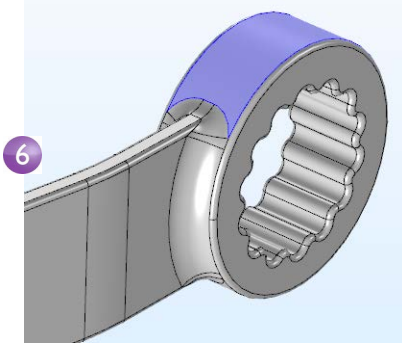


边界载荷节点上显示的“警告”属性表明，其边界选择为空。下一步是选择边界。

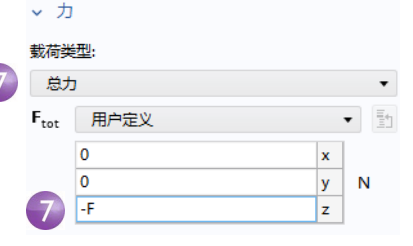
5 在**图形**窗口中，单击工具栏中的**缩放框**按钮，然后拖动鼠标选择右图所示的方形区域。释放鼠标按键，将选定区域放大。



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。



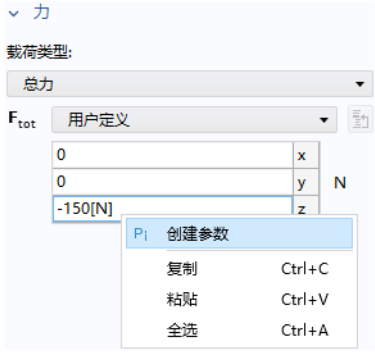
7 在**边界载荷设置**窗口的**力**栏中，选择**总力**作为**载荷类型**，然后在 *z* 分量的文本框中输入 -F。负号表示负 *z* 方向（向下）。通过这些设置，150 N 的载荷将均匀分布在选定的表面上。



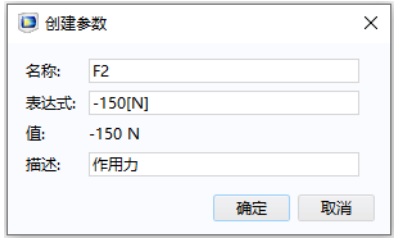
请注意，为了简化建模过程，您可以使用材料界面边界条件来近似描述螺栓与扳手之间的机械接触。这种内部边界条件是自动定义的，可以确保跨材料界面的正应力和位移的连续性。此外，您还可以使用 “结构力学模块”对机械接触等进行更为详尽的分析。

直接从文本框中添加参数

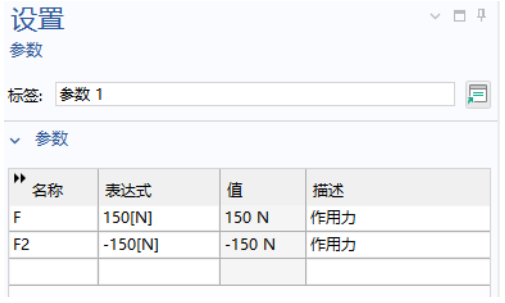
作为上述方法的替代方法，您可以直接在文本框中添加或编辑参数。以扳手模型为例，首先在**总力** *z* 分量的文本框中键入值。然后，右键单击该文本框并从下拉菜单中选择**创建参数**，此时会打开**创建参数**对话框，如下面第二个图所示。



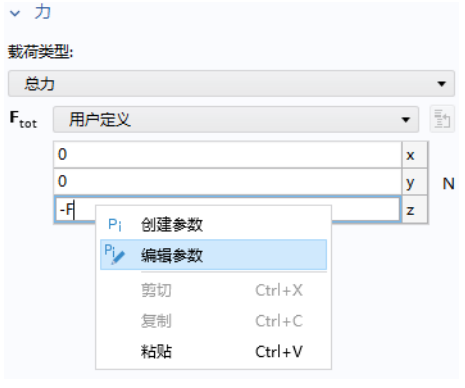
您可以在该对话框中输入参数**名称**和**描述**。



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，会弹出工具提示，显示相应的参数或表达式的值。此功能仅在值为常数时适用。



作为编辑参数的替代方案，您也可以使用从**主屏幕**选项卡的**窗口**菜单中打开的**数据查看器**窗口进行操作。



此窗口将在 COMSOL Desktop 中保持打开状态，直到您选择将其关闭为止。

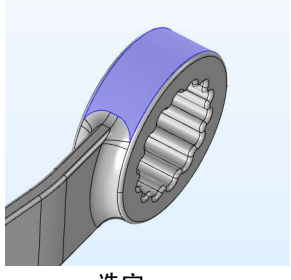
选择边界和其他几何实体

当边界处于未选中状态时，通常显示为灰色，但在您使用**材料**中的**外观**设置时存在例外，具体请参见第 97 页。要选择边界，首先将光标悬停在该边界上，此时它会以红色突出显示（假定该边界之前未被选中）。然后，单击以使用鼠标左键将其选中，它会变成蓝色，并且其编号将显示在相应边界条件**设置**窗口的**选择**列表中。在选中边界后再次将光标悬停在其上方时，它会变成绿色。如果单击以绿色突出显示的边界，它将变为取消选中状态，并再次显示为灰色。同样的选择和取消选择技巧也适用于几何对象、域、边界、边和点。

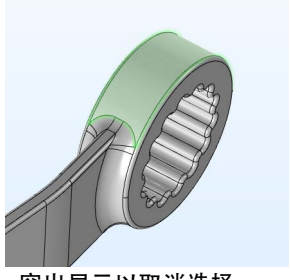
下图显示边界的不同选择状态。



突出显示以进行选择



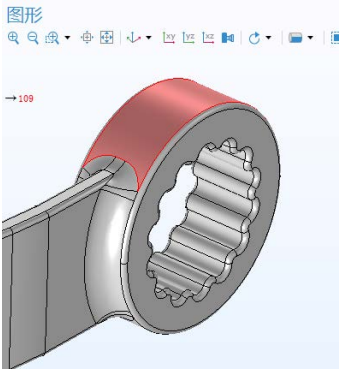
选定



突出显示以取消选择

要选择隐藏在离您最近的表面之后的内部表面，您可以通过鼠标指针采用以下任一方法来循环选择边界：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，或者在触摸板上进行双指拖动操作。

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。



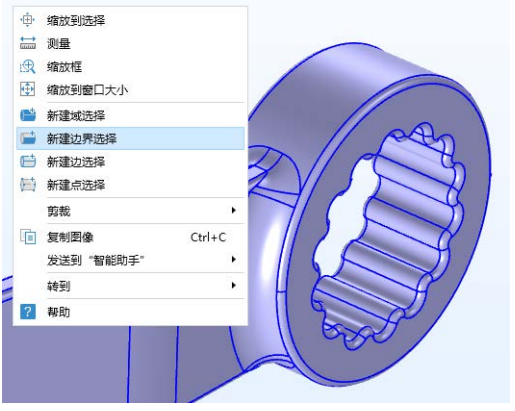
同样，在选择域、边和顶点时，会显示相应的几何实体编号。

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。

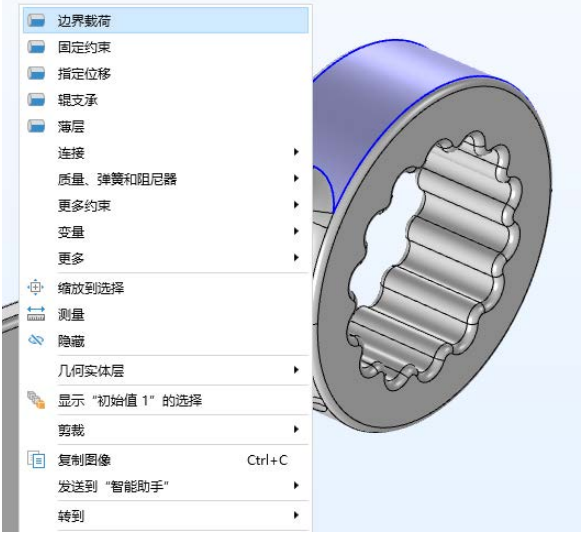
使用图形窗口上下文菜单进行选择

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。



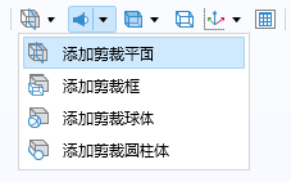
单击以选择要应用边界条件的边界。（本例中为套筒顶面，即边界 **111**。）然后，再次右键单击并选择**边界载荷**，如下图所示。



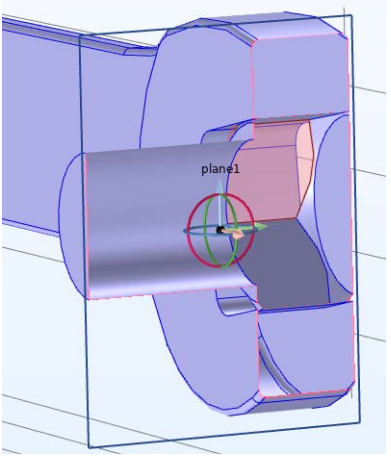
除此之外，您也可以使用此方法在已创建的边界条件选择中添加附加边界。比如，在上面的示例中，您可以在选中**固定约束**节点的同时，选择菜单选项**添加到“固定约束 1”的 “边界选择”**（尽管该选项在本例中不适用）。

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。

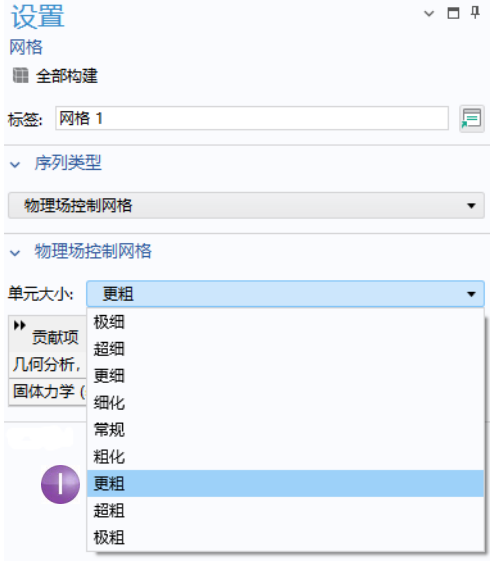


网格

网格设置是确定用于离散模型的有限元网格分辨率的关键步骤。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。在每个四面体单元中，通过使用一组多项式函数来近似表示结构位移场 —— 对象在三个坐标方向的变形程度。通过对位移场进行微分可以计算出应变；然后，通过将材料属性与应变相结合，能够计算出相应的应力。

在本例中，较粗的网格已足以捕捉应力场的变化，并能提供相当精确的结果。不过，为了提高计算精度而细化网格，往往会导致性能下降和内存使用量的增加。

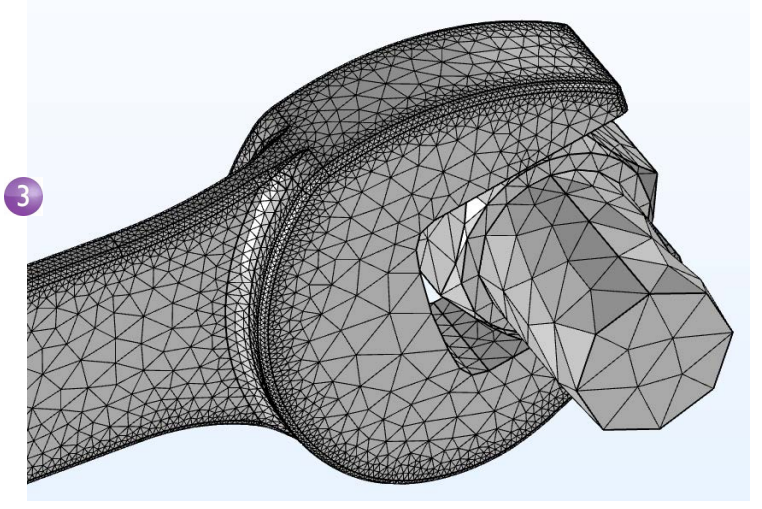
1 在**模型开发器**的**组件 1** 节点下，单击**网格 1** 。在**网格设置**窗口的**网格设置**栏中，从**单元大小**列表中选择**更粗**。



2 在**设置**窗口或**网格**工具栏中单击**全部构建**按钮 。

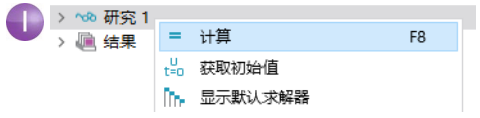
对于生成的网格，需要大约 6.5 GB 的内存才能求解。如果您的计算机内存小于 6.5 GB，可以从**单元大小**列表中选择**超粗**或**极粗**（而不是**更粗**）。

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）。



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）。

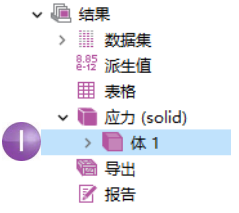


经过几秒钟的计算，**图形**窗口将显示默认绘图。在计算过程中，**进度**窗口会实时显示求解器的进度信息。计算完成后，您可以在**消息**和**日志**窗口中获取计算相关的其他有用信息；您只需单击**图形**窗口下方的**消息**和**日志**选项卡，即可查看此类信息。或者，您也可以从功能区中**主屏幕**选项卡的**窗口**下拉菜单中打开**消息**窗口。



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**。

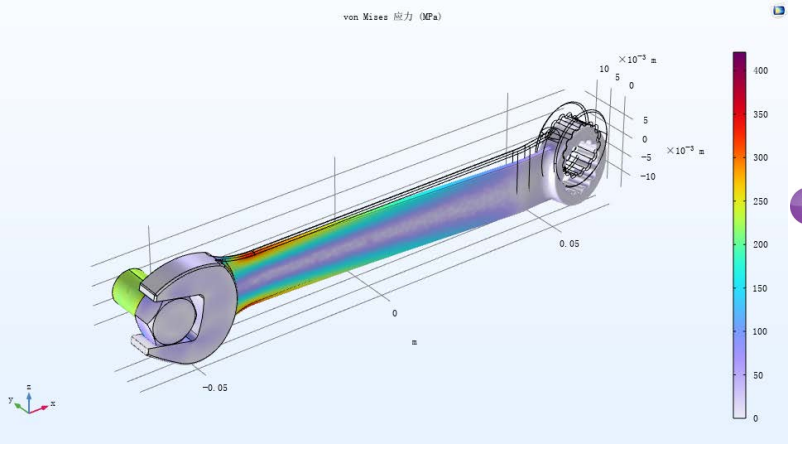


2 在**设置**窗口的**表达式**栏下，从**单位**列表中选择 **MPa**（或在编辑框中键入 MPa）。

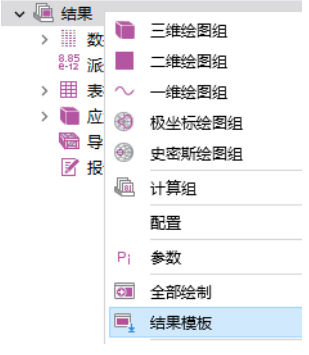


3 在**体图设置**窗口的工具栏中单击**绘制**按钮，然后单击**图形**窗口工具栏中的**切换到默认三维视图**按钮。

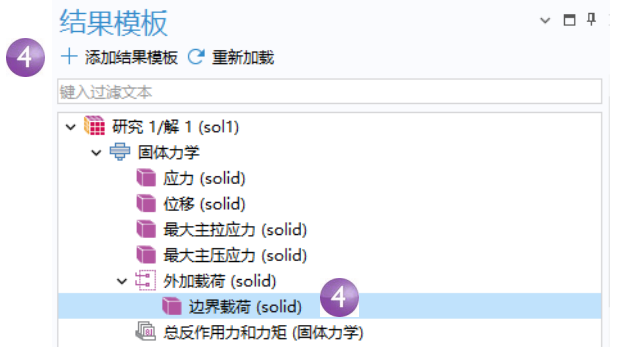
绘图将显示在施加垂直载荷时，螺栓与扳手中的 von Mises 应力分布。



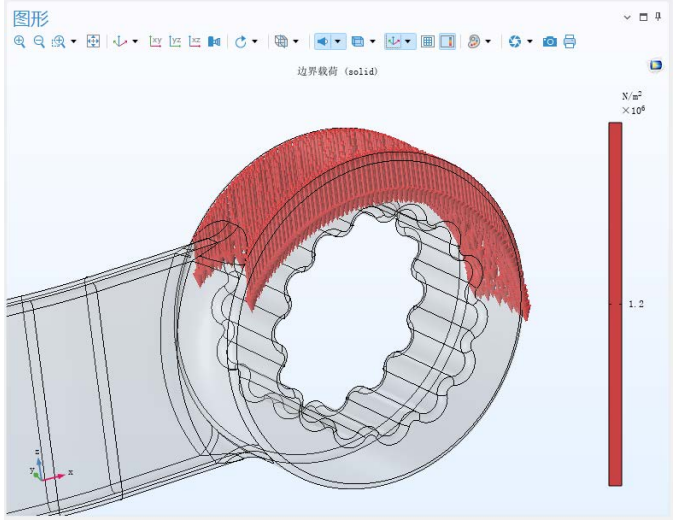
您可以添加额外的预定义绘图，方法是：从**结果**下的**结果模板**定义的列表中进行选择，或单击功能区**主屏幕**选项卡中的相应按钮。



4 您可以生成外加载荷分布的可视化效果等。右键单击**结果**并选择**结果模板**。在**结果模板**窗口中，选择**固体力学** > **外加载荷** > **边界载荷**，然后单击**添加绘图**。

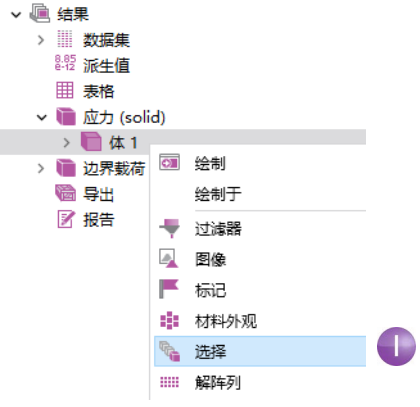


由此生成的绘图使用箭头显示边界载荷。

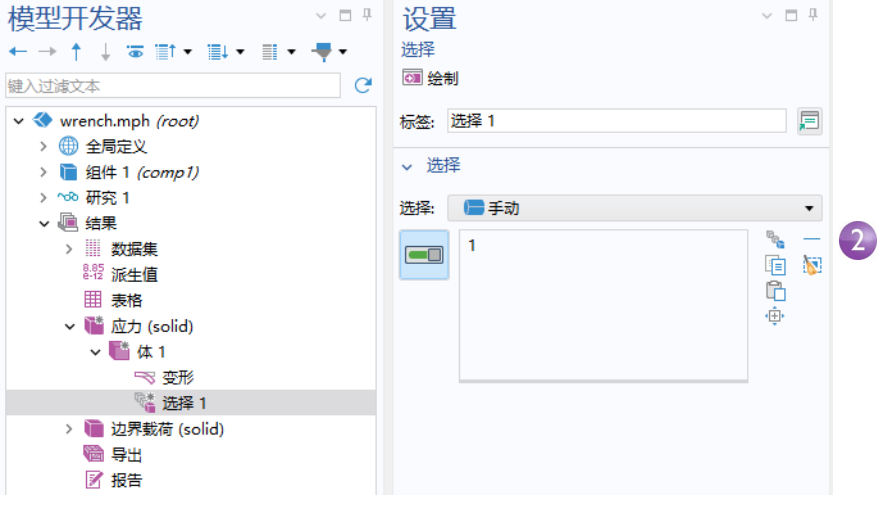


由于本次仿真的目的不是分析螺栓的应力，我们可以通过添加**选择**节点，选择性地仅对扳手的应力进行可视化。

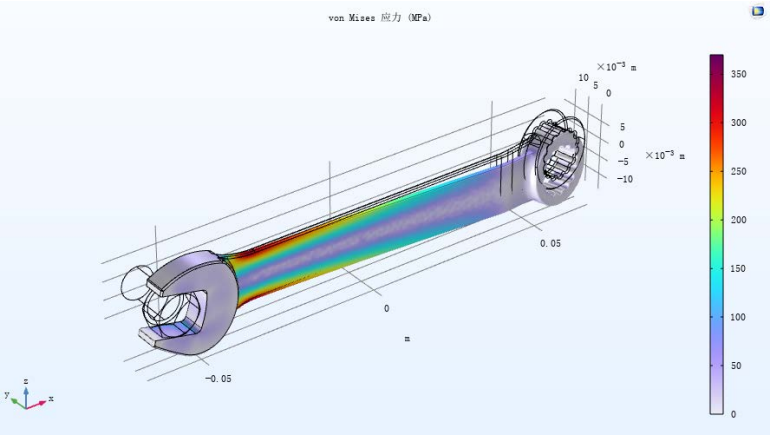
1 右键单击**应力** > **体**节点并单击**选择** 。



2 在**图形**窗口中，单击扳手 （域 1）。



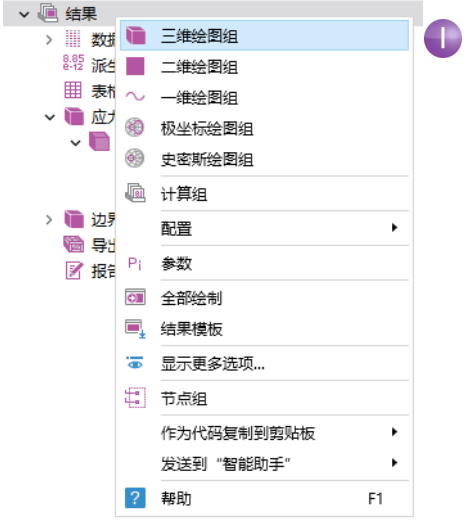
3 单击**绘制**以查看可视化效果。



3

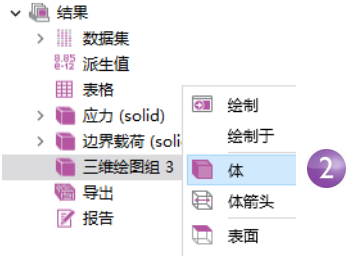
对于扳手这类工具常用的典型钢材，其屈服应力约为 600 MPa，这意味着在 150 N 载荷（约合 34 磅力）作用下，扳手已接近塑性变形的边缘。同时，您可能还需要考虑例如安全系数为 3 的一定安全裕度。要快速评估扳手的哪些部位存在塑性变形的风险，可以绘制如 `solid.misesGp>200[MPa]` 这样的不等式表达式。（这里的后缀 `Gp` 表示应力变量是从有限元高斯点获得的。）

1 右键单击**结果**节点 并添加**三维绘图组** 。



1

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.misesGp`。现在，将该表达式进行如下编辑：`solid.misesGp>200[MPa]`。



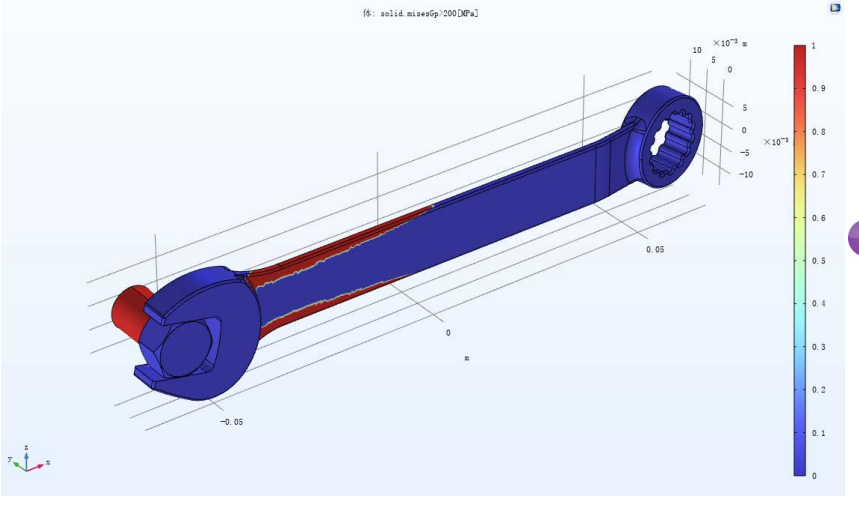
这是计算结果为 1 (true) 或 0 (false) 的布尔表达式，计算结果为 1 的区域超出安全裕度。

4 将**颜色表**改为 **RainbowLight**，然后单击**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。

请注意，有时执行以下操作更为高效：右键单击**绘图组**，并从菜单中选择**复制粘贴**，然后对绘图设置进行必要的更改。

从生成的绘图可以看出，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，需要对手柄设计进行微调，例如增加其宽度。



5

您可能已经注意到，出于多种考量，制造商选择了不对称的扳手设计。因此，在扳手翻转时，应力场可能会有所变化。现在，您可以尝试反向施加相同的力，并观察最大 von Mises 应力的可视化结果，看看是否存在差异。

收敛性分析

借助 COMSOL Multiphysics 等仿真软件，设计人员可以通过减少实验或产品测试次数等多种方式，大幅缩短设计时间。然而，仿真软件并不能完全替代实际测试，尤其在可能发生物理或环境损害的情形中，这一点需格外注意。进行收敛性分析有助于降低根据仿真结果得出错误结论的风险——尽管风险无法彻底消除，但能够有效控制。

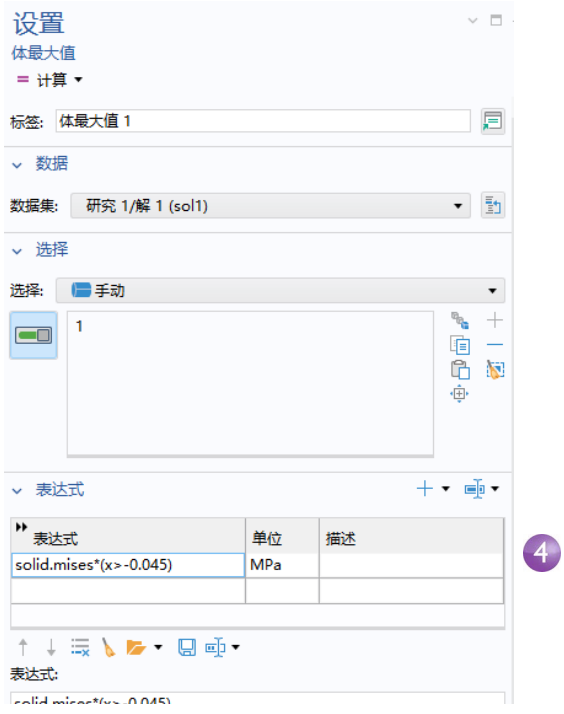
为了检查扳手模型中最大 von Mises 应力的计算精度，可进一步开展网格收敛性分析。具体而言，可采用更细的网格，以增加计算自由度 (DOF)，从而提升结果的可信度。

本节将阐述一些进阶功能，首次阅读时可以跳过以下步骤。需要注意的是，由于螺栓与扳手之间的机械接触近似于材料界面边界条件，该区域会出现应力奇异点。因此，我们将忽略此处的应力，而将重点放在手柄上。您可以使用“结构力学模块”对机械接触等进行更为详尽的分析。

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**部分右键单击**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。此外，由于我们只对手柄的应力值感兴趣，因此可以通过将应力变量乘以表达式 `(x>-0.045)` 来实现。
3. 定位到**表达式**表的第一行，在**表达式**列中键入 `solid.mises*(x>-0.045)`。

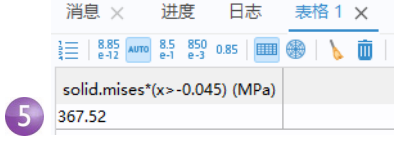
4 在**表达式**表中，键入 MPa 作为**单位**。



此外，为了获得最佳精度，可以在同一设置窗口的**配置**栏中，将**点类型**更改为**高斯点**。



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 368 MPa。该值可能因软件版本和硬件平台的不同而略有差异。



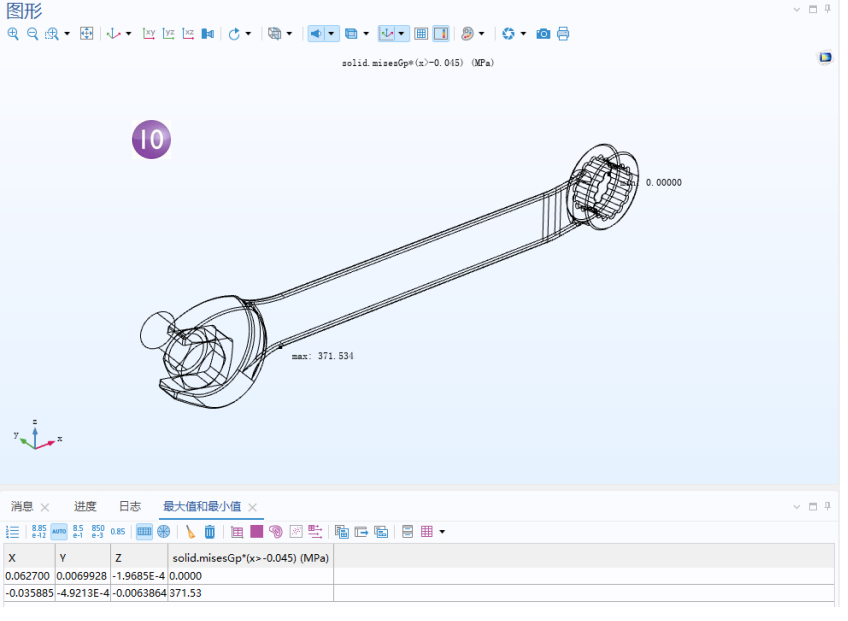
6 为了查看出现最大值的位置，您可以使用**体最大值 / 最小值**等绘图。右键单击**结果**节点 并添加**三维绘图组** 。然后，右键单击**三维绘图组 4** 节点 ，并选择**更多体图 > 体最大值 / 最小值** 。将**三维绘图组 4** 的名称改为**应力最大值 / 最小值**。

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.misesGp*(x>-0.045)`。您也可以使用**过滤器**节点：右键单击**体最大值 / 最小值**图，并选择**过滤器**，然后将**包含逻辑表达式**更改为 `x>-0.045`。

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 。此类绘图能够同时显示最大值和最小值的位置，并在其下方的表格中显示对应的坐标位置 （确切的值可能因您运行的版本而有所不同）。



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**。



请注意，由于计算方法存在细微差异，使用这种方法得出的最大值和最小值可能会有所出入。

网格参数化

接下来，我们将定义一个参数化扫描，以在求解时逐步细化网格大小，并最终绘制出最大 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 （或表格下方的编辑框）中输入以下设置：

- 在**名称**列或编辑框中输入 hd，用于在参数化扫描中控制单元的大小。
- 在**表达式**列或编辑框中输入 1。
- 在**描述**列或编辑框中输入**单元大小除数**。

3 现在输入另一个参数，**名称**为 h0，**表达式**为 0.01/3，**描述**为**初始单元大小**，用于定义参数化扫描开始时的单元大小。

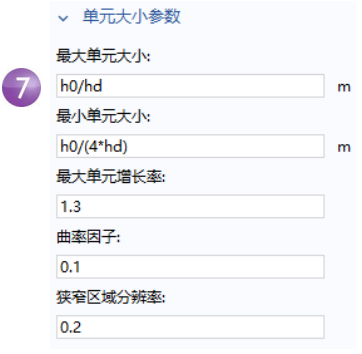


4 在**模型开发器**窗口的**组件 1** 节点下，单击**网格 1** 。在**网格**的**设置**窗口中，从**序列类型**列表中选择**用户控制网格**。

5 在**网格 1** 下，删除**大小 1** 节点 。该设置用于控制边界网格，为了简化设置，将仅使用体设置。

6 在**网格 1** 下，单击**大小**节点 。

7 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 107 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 1，在**步长**框中



输入 1，并在**停止**框中输入 4。

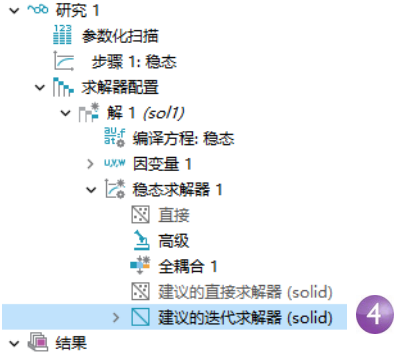
单击**替换**。**参数值列表**此时将显示 `range(1,1,4)`。

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 170 页。

对于 hd 的最大值，自由度数将超过 300 万。因此，我们将切换为内存效率更高的迭代求解器。

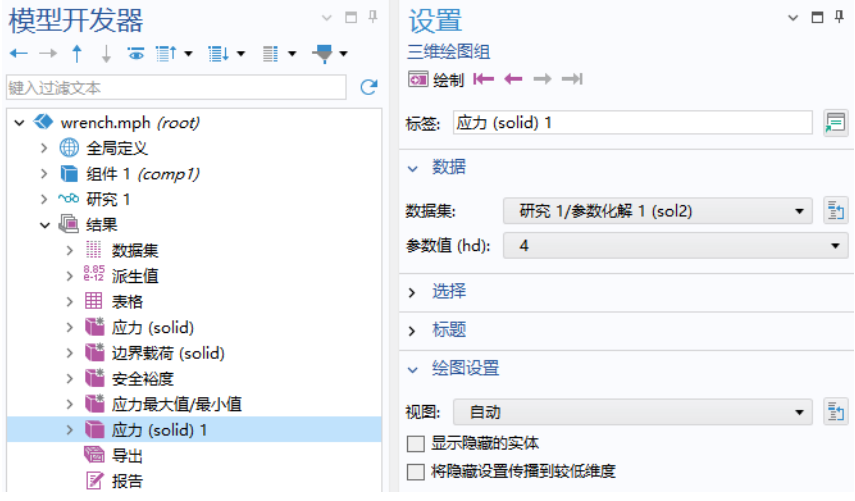
4 在**研究 1** > **求解器配置** > **解 1** 下，展开**稳态求解器 1** 节点，然后右键单击**建议的迭代求解器**并选择**启用**。通常，选择迭代求解器选项可以减少内存使用量，但求解器设置需要针对特定的物理场进行定制，以达到高效计算的目的。



5 单击**研究 1** 节点并选择**计算**，该按钮位于**设置**窗口，也可以右键单击该节点进行选择。此外，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性能），内存使用量约为 10 GB。如果您的系统内存不足，也可以使用参数化扫描，范围可以设置为 1 到 3，或仅细化为 1 到 2。

结果分析

请注意，在运行参数化扫描后，软件会自动创建一个与新的**数据集研究 1/ 参数化解 1** 对应的默认绘图节点。



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。

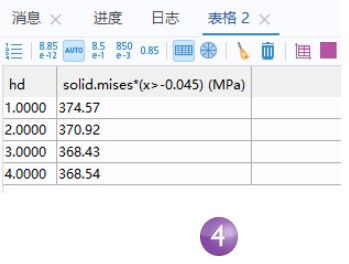
1 在**模型开发器**窗口的**结果** > **派生值**下，选择**体最大值 1** 节点 MAX。

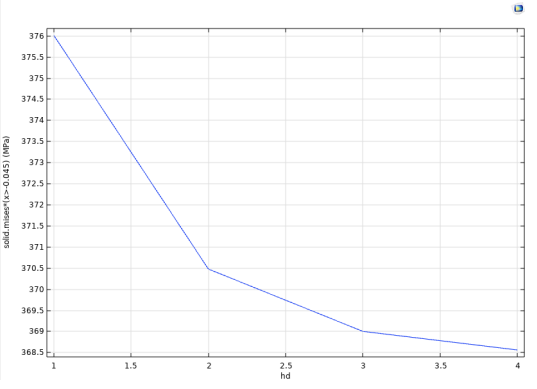
参数化扫描的解存储在名为**研究 1/ 参数化解 1** 的**数据集**中。现在，根据需要更改**体最大值**设置：

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 （在网格收敛度达到更高的值之前，由于更粗网格版本之间的网格有轻微变化，前几个值可能会有所差异）。





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**。

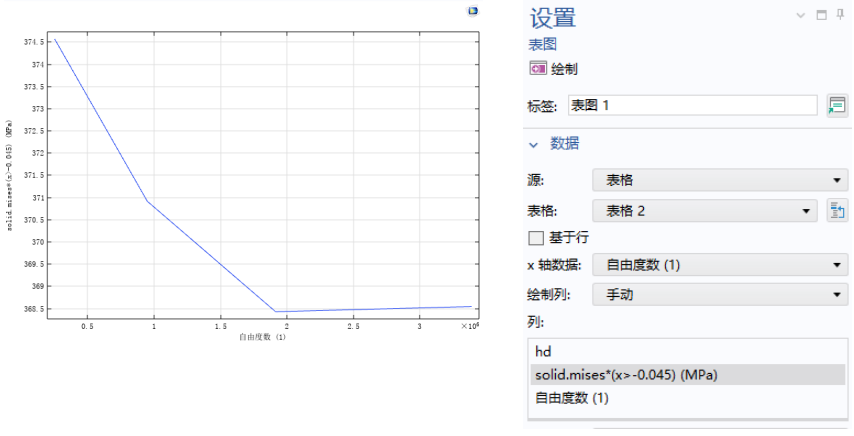
7 在**表达式**框中输入 `numberofdofs`。

> 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，以便在**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。

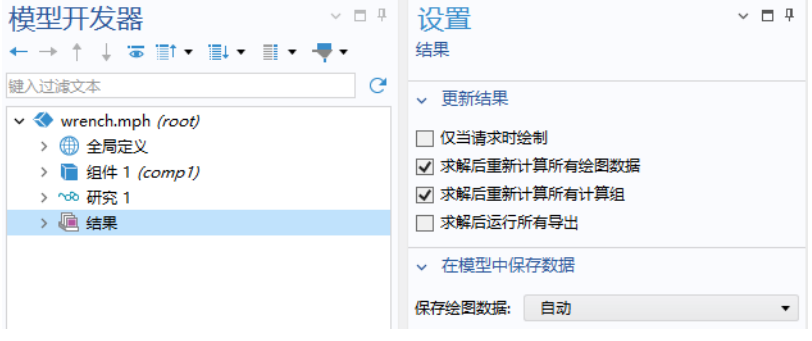
这项网格收敛性分析表明，扳手手柄中计算得到的最大 von Mises 应力值将从约含 250,000 个自由度的网格对应的高初始值降低至约含 3,400,000 个自由度的网格对应的 369 MPa。如果进一步细化网格，就会发现结果将大致保持在 369 MPa 左右。

下图显示相关的**表图**和**表图设置**窗口。



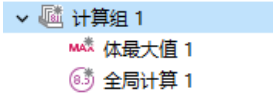
请注意，根据您运行的 COMSOL Multiphysics 版本，上述值可能会因网格划分算法生成的单元数的变化而略有不同。

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。为了启用这一功能，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，您还可以选择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。



为了获得最佳精度，可以定位到**体最大值**设置窗口，并在**配置**栏中确保**点类型**设置为**高斯点**。

下图显示相应的**计算组**表格。



hd	solid.mises*(x>-0.045) (MPa)	自由度数 (1)
1.0000	374.57	2.5119E5
2.0000	370.92	9.4881E5
3.0000	368.43	1.9149E6
4.0000	368.54	3.3919E6

扳手教程到此结束。

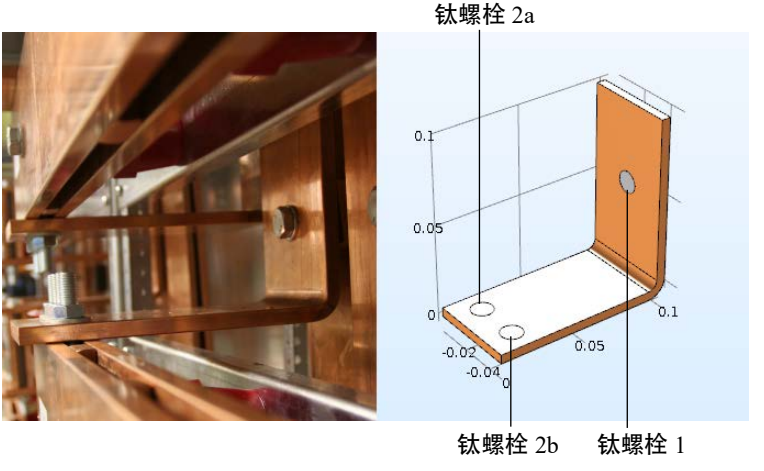
示例 2：母线板 —— 多物理场模型

母线板焦耳热

本教程演示在 COMSOL Multiphysics 中使用 “模型开发器”进行多物理场建模的概念。您将学习如何使用众多预配置的多物理场组合中的一种，并逐步添加最初未包含在分析中的物理现象的效应。最终，您将构建一个真实的多物理场模型。

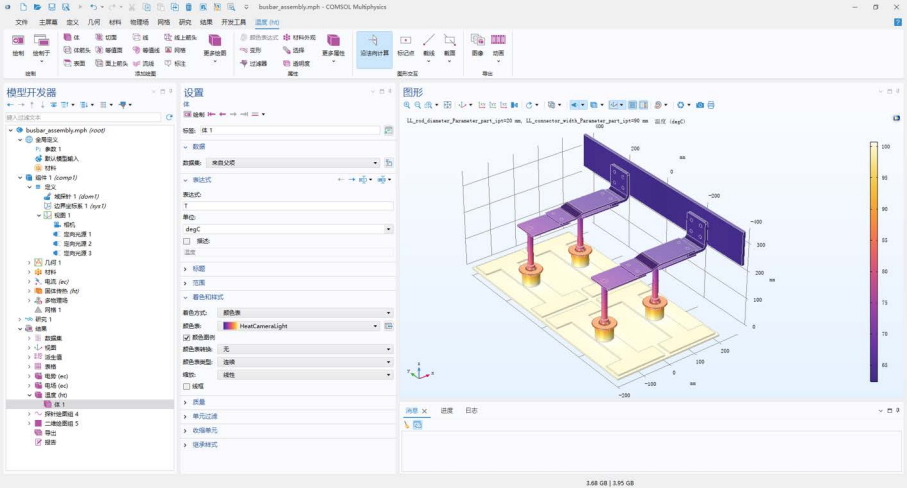
本例要创建的模型旨在分析工业环境中用于传导大量直流电的母线板 （见下图）。当母线板中的电流从螺栓 1 传导至螺栓 2a 和 2b 时，会由于电阻损耗而产生热量，这种现象称为焦耳热。母线板由铜制成，而螺栓则由钛合金制成。尽管母线板螺栓通常采用钢材，但在本例中，我们假设存在一个强腐蚀性环境，因此选择了钛合金。

在正常工作条件下，电流主要通过铜传导。然而，本例关注的是通过螺栓对母线板产生非预期电流载荷的影响。材料的不同在这里显得尤为重要，由于钛的电导率比铜低，因此将承受更高的电流密度。



仿真的目的在于精确计算母线板产生的热量。一旦掌握了基本的多物理现象，您便能进一步探究母线板中因热膨胀产生的结构应力和应变，以及气流的冷却效应。

焦耳热效应可以通过电流和能量守恒定律来描述。根据这两个定律，可以分别求解出温度场和电场。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对设备的冷却或加热没有影响。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，这相当于在这种母线板中产生了相对较高且有潜在危险的负载。“AC/DC 模块”提供了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”和部分 CAD LiveLink™ 产品）提供了更高级的模型，能够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 137 页的“参数、函数、变量与耦合”，介绍如何定义函数和非局部耦合。
- 第 142 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 144 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 147 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 170 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 182 页的“并行计算”，概括介绍如何基于集群进行求解。
- 第 186 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。

1 双击桌面上的 COMSOL Multiphysics 图标以打开软件。



接着，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** 。）

请注意：根据已安装的附加模块情况，您的物理场列表显示项数可能较少。右图展示了安装所有附加模块后的完整界面效果。



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。

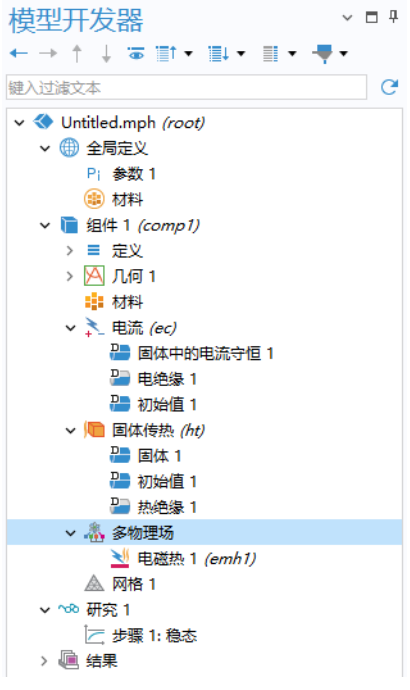
选择稳态研究意味着在母线板与周围环境达到热平衡时，对其稳态温度进行求解。



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。

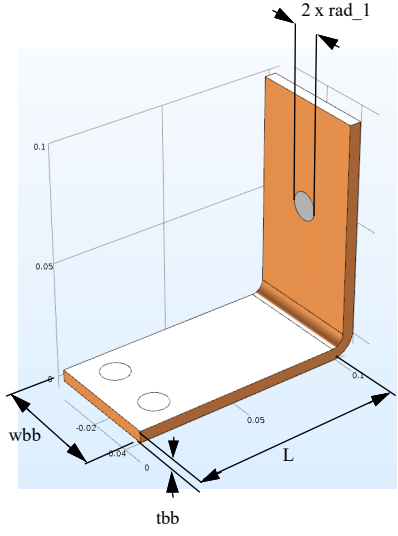
请注意，您的研究列表中的研究类型可能更少，具体取决于安装的附加模块。

物理场接口是为特定物理领域设计的专属用户界面，让用户能够定义相关方程，并完整设置网格生成、求解器配置、可视化和结果处理等流程。多物理场接口则进一步融合了单物理场接口与多物理场耦合功能。**焦耳热**多物理场接口由**电流**和**固体传热**两个物理场接口组成，并与**多物理场**分支下的**电磁热**实现多物理场耦合。这种耦合方式具有高度灵活性，可让您充分利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。



为了节省时间，建议您直接从文件中加载几何。您可以转到第 89 页的“几何”部分查看相关内容。

如果您更倾向于亲手绘制几何图形，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 并跳转到第 215 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作用域的**参数**、**变量**和**函数**。模型树能够同时包含多个模型组件，而全局作用域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。如果您希望将作用域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**。但请注意，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：母线板下部的长度 `L`、钛螺栓的半径 `rad_1`、母线板的厚度 `tbb` 以及设备的宽度 `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 215 页的 “附录 A—— 构建几何”。

自动补全和查找工具

模型树中包含许多参数和变量，您可以使用自动补全和查找工具来更便捷地进行查找，具体方法如下。

自动补全

您可以使用 Ctrl+/ 来自动补全参数和变量名称。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。

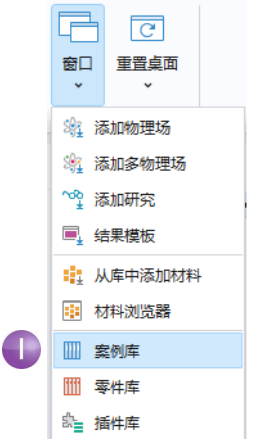


搜索结果显示在**包含**和**替换为**编辑框的下方。本例中的结果来自完成的母线板模型，通过搜索字符串**电流**得到。

您可以双击此窗口中的任意行来打开相应的**设置**窗口。

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**。



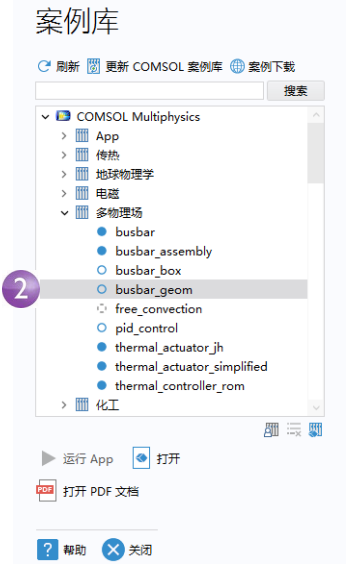
2 在**案例库**树的 **COMSOL Multiphysics** > **多物理场**分支下，选择 **busbar_geom**。

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。

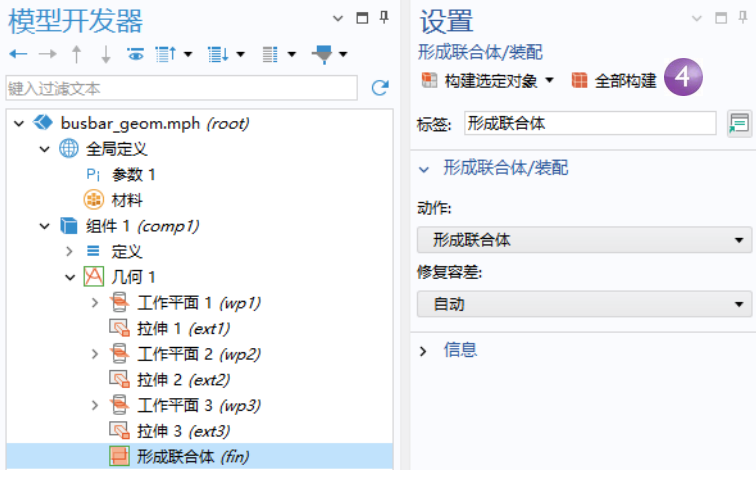


3 在**全局定义**节点 下单击**参数**节点 。

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。

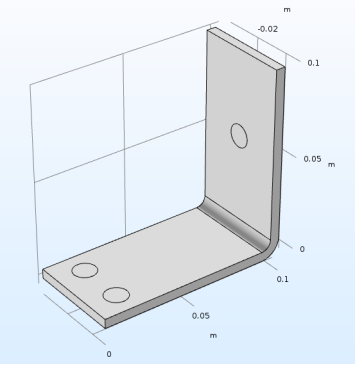


4 在**模型开发器**窗口的**组件 1** > **几何 1** 下，单击**形成联合体**节点 ，然后单击**设置**窗口中的**全部构建**按钮 以返回几何序列。您也可以使用功能区，在**主屏幕**选项卡的**几何**组中单击**全部构建**。

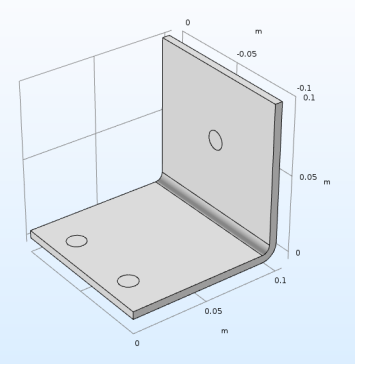


5 在**图形**工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮，可以在**图形**窗口中看到更宽的母线板。





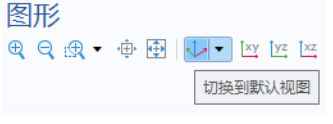
wbb = 5cm



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。

7

参数

名称	表达式	值
L	9[cm]	0.09 m
rad_1	6[mm]	0.006 m
tbb	5[mm]	0.005 m
wbb	5[cm]	0.05 m
mh	3[mm]	0.003 m
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m²·K)

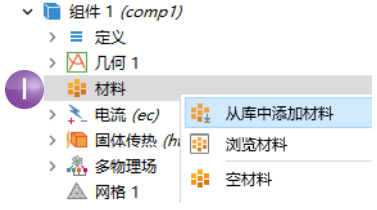
10 如果是您自己构建的几何，就可以使用 busbar.mph 文件；如果是从**案例库**窗口打开的文件，则从“文件”菜单中选择**另存为**，并将模型重命名为 busbar.mph。

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。母线板采用铜材料，螺栓则由钛合金制成。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。

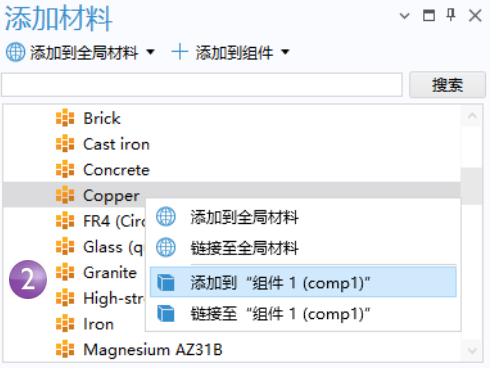


如果在未定义材料的情况下尝试求解，**材料**节点的左下角会显示一个红色的 ×，我们将在接下来的步骤中进行材料设置。

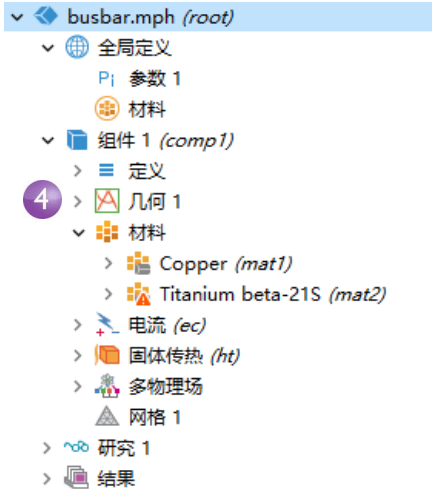
2 在**添加材料**窗口中，展开**内置材料**文件夹并定位到 **Copper**。右键单击 **Copper** 并选择**添加到组件 1**。您也可以通过双击来完成此操作。

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，具体取决于当前的选择。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。

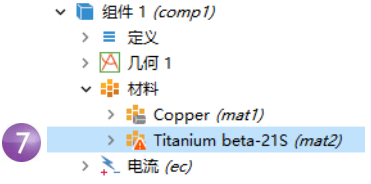
属性	变量	值	单位	属性组
电导率	sigma_iso ; si...	5.998e7[S/m]	S/m	基本
恒压热容	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	基本
相对介电常数	epsilonr_iso ;...	1	1	基本
密度	rho	8960[kg/m^3]	kg/m³	基本
导热系数	k_iso ; kii = k_...	400[W/(m*K)]	W/(m·K)	基本
相对磁导率	mur_iso ; muri...	1	1	基本
热膨胀系数	alpha_iso ; alp...	17e-6[1/K]	1/K	基本
杨氏模量	E	110[GPa]	Pa	杨氏模量和泊松比
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情况的有用信息。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。

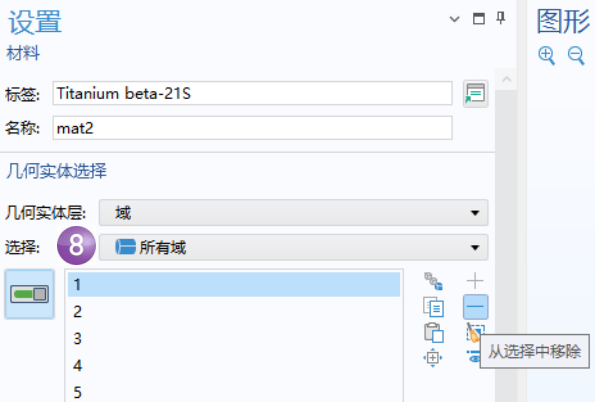
上表中的**热膨胀**系数、**杨氏模量**和**泊松比**属性暂未使用，但稍后在模型中添加热致应力和应变时，这些属性将不可或缺。

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，以替代原先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** 。



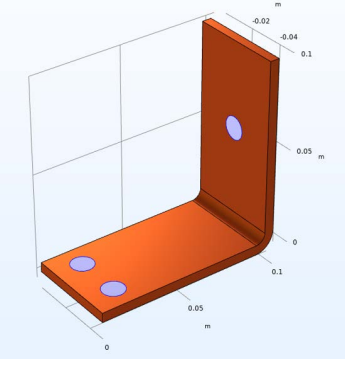
8 从**选择**列表中选择**所有域**，然后单击列表中的域 1。现在，从选择列表中移除域 1。

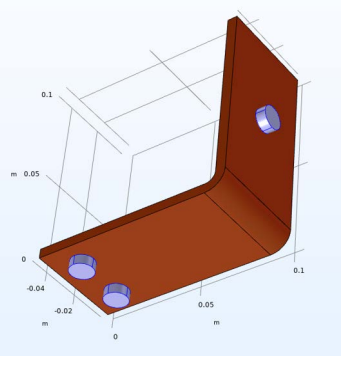


要从选择列表中移除域（或任意几何实体，如边界、边或点），可以使用以下两种方法之一：

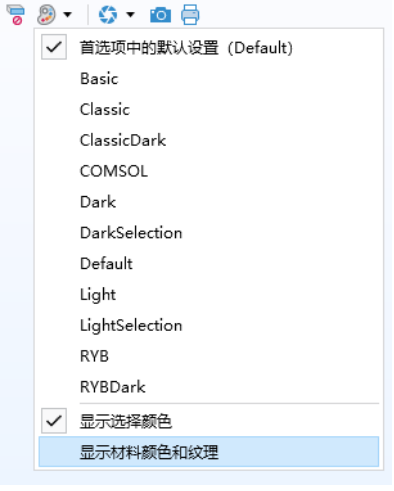
- 在**材料设置**窗口的选择列表中，单击域 1。然后单击**从选择中移除**按钮 –，或按键盘上的“删除”(Delete) 键。
- 此外，您也可以在**图形**窗口中单击域 1，将其从选择列表中移除。

8 域 2、3、4、5、6 和 7 以蓝色突出显示。

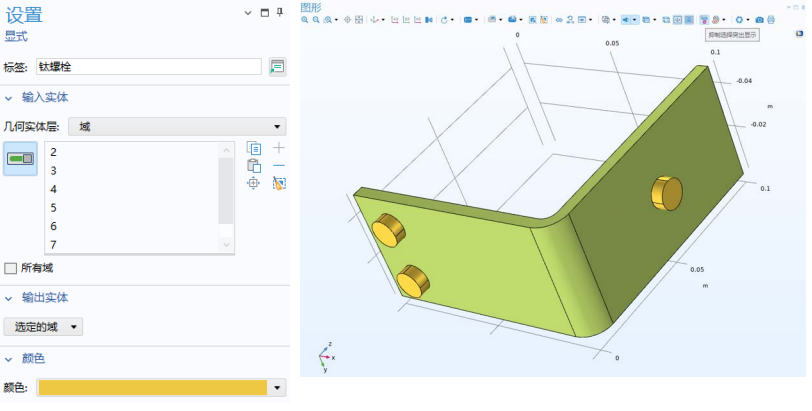




您可以通过**图形**窗口中的**颜色**工具栏按钮来启用和禁用材料颜色和纹理。选择**显示材料颜色和纹理**后，可以使用逼真的颜色来渲染铜组件，同时也会启用其他材料的真实渲染效果。在此，您还可以通过**显示选择颜色**选项对选择启用着色，并能够更改**图形**窗口中使用的颜色主题。



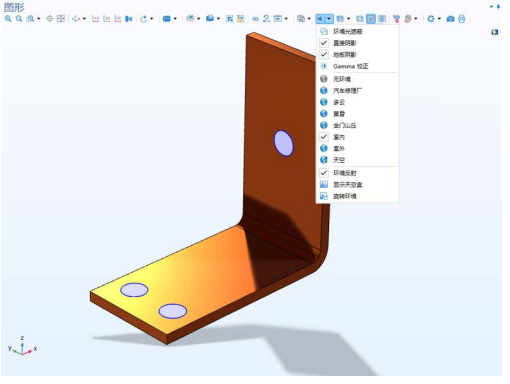
下图显示了一个选择对应的**设置**和**图形**窗口，其中使用了与默认设置不同的颜色（黄色）。另一个选择（未显示）使用了其他颜色（绿色）。



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 150 页。

为了进一步增强材料渲染的真实感，您可以从**图形**工具栏的**场景光**菜单按钮启用**环境反射**，并在此菜单中选择**室内环境**或**室外环境**。此外，还可以启用**直接阴影**和**地板阴影**效果。

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，这种效果尤为明显，如下图所示。



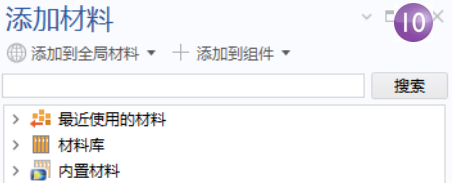
通过选择**显示天空盒**选项，可以显示用于环境反射的相应天空盒图像。

为了获得最佳结果，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”一节。需要注意的是，并非所有这些可视化选项都将在本例的后续部分中得到应用。

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 ☑。

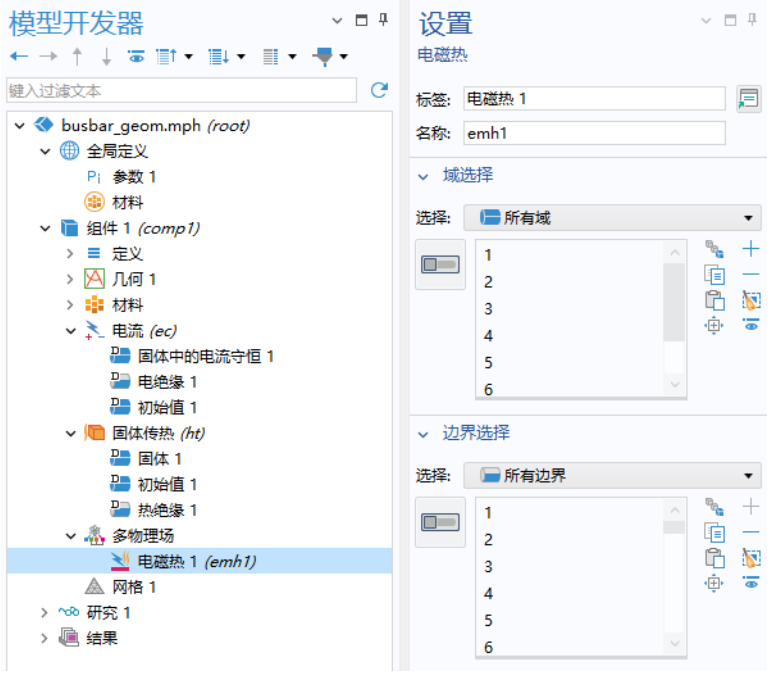


10 您可以通过以下任意方式关闭**添加材料**窗口：单击右上角的关闭图标，或者在功能区**主屏幕**选项卡的**材料**组中单击**添加材料**切换按钮 。



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，因此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。

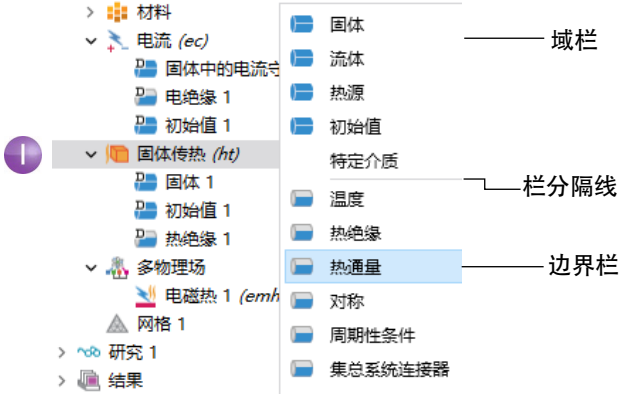
电流节点下的**电流守恒**节点表示域层的电流守恒，而**电绝缘**节点则包含**电流**的默认边界条件。

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。

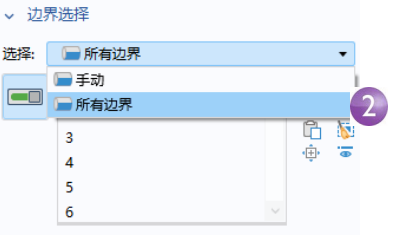


接下来，定义边界条件。

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**。



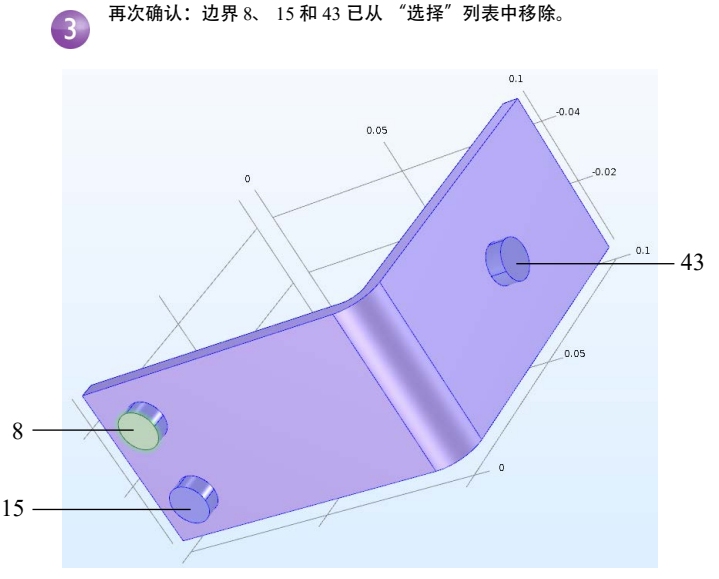
2 在**热通量**的**设置**窗口中，从**选择**列表中选择**所有边界**。



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。将鼠标指针移至一个圆形钛螺栓的表面，使其以绿色突出显示。然后，单击该螺栓表面，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。这样，就可以移除边界 8、 15 和 43。



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。

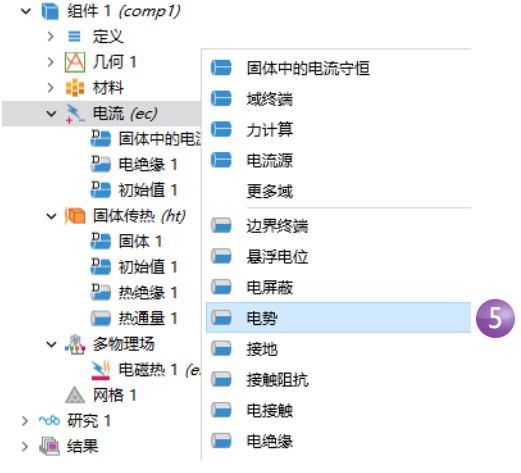
该参数有两种输入方式：在第 85 页的“全局定义”中的**参数**表中输入，或者随几何导入。



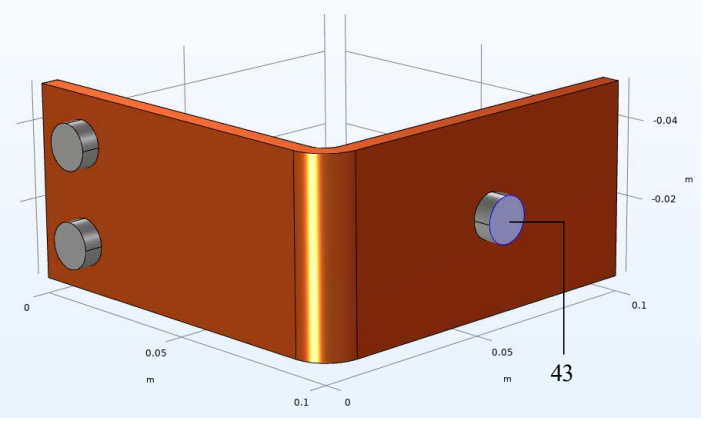
“传热模块”提供了更高级的边界条件用于传热分析。例如，能够给出总沉积功率，或者为常见的自然对流场景（如水平或垂直壁）设置边界条件等。

接下来，按照以下步骤为电流设置边界条件：

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。

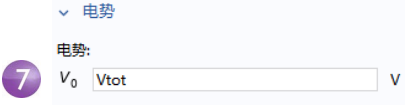


6 将鼠标指针移到单个钛螺栓的圆形面上，使其突出显示，然后单击将其（边界 43）添加到**选择**列表。



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。



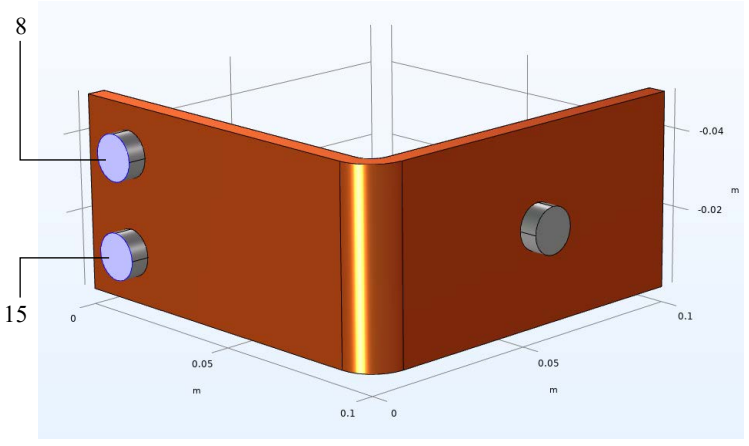
8 在**模型开发器**窗口中，右键单击**电流**节点 。在上下文菜单的边界栏中选择**接地**。**接地**节点 会添加到模型树中。此时，模型树节点序列应与下图相符。



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。

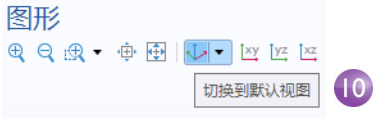
9 在**图形**窗口中，单击余下的其中一个螺栓，将其添加到**选择**列表中。

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。

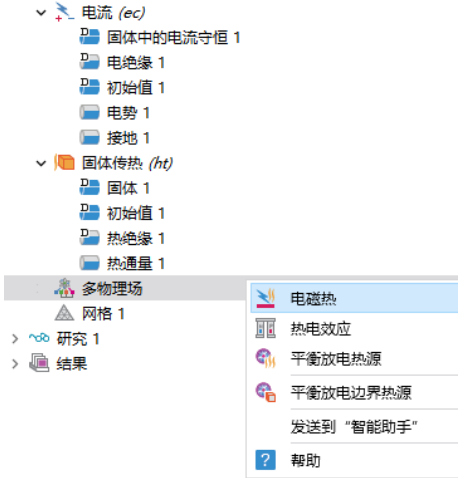
10 在**图形**工具栏中，单击**切换到默认视图**按钮 。



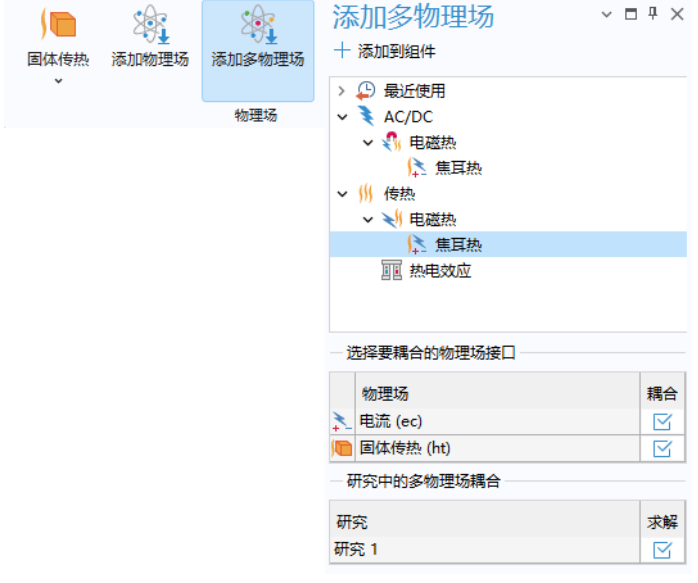
“AC/DC 模块”提供更高级的电磁分析边界条件，例如在边界上指定总电流的功能。

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，可以先构建并求解**电流**模型，然后再添加**固体传热**。在此过程中，您可以右键单击**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

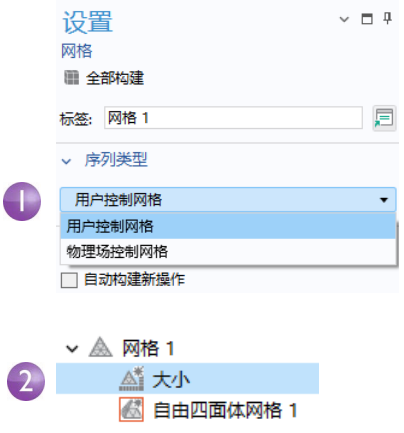
最简便的网格划分方法是创建非结构化的四面体网格，这非常适用于母线板模型。或者，您也可以创建多个网格划分序列，如第 144 页的“添加网格”所示。

默认情况下，系统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，以便对网格设置进行参数化处理。

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。

根据您之前的选择，可能会有一个额外的**大小 1** 节点用于控制边界上的网格。在这种情况下，请删除该节点。



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，可以通过它来限制单元大小。
- 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。

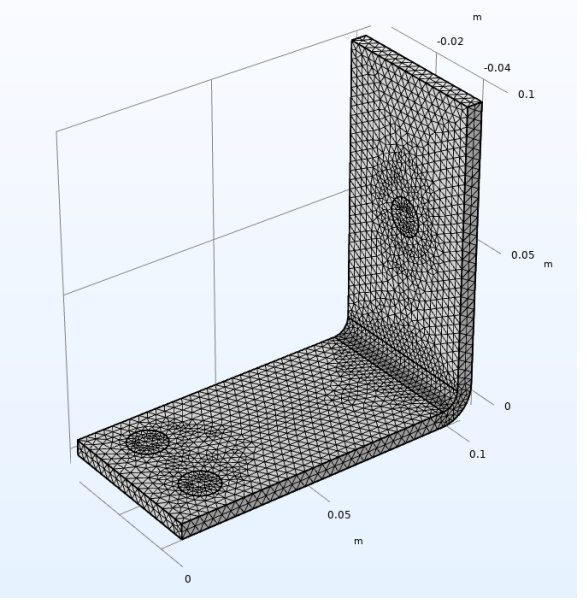
其他两个参数保持不变。

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。

大小节点 右上角显示的星号 (*) 表示该节点处于编辑状态。

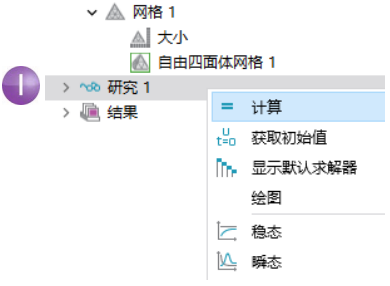
4 单击**大小设置**窗口中的**全部构建**按钮 ，以创建如下图所示的网格：



4

此外，您也可以在功能区**主屏幕**选项卡中单击**构建网格**。

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**。

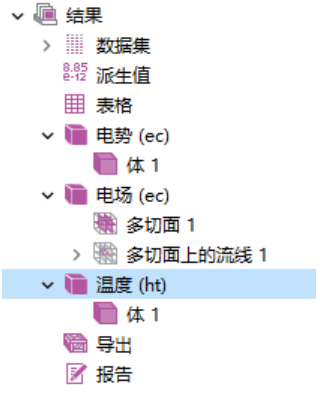


研究节点 会基于选定的物理场和研究类型自动定义仿真的解序列。在本例中，仿真的求解过程仅需几秒钟即可完成。在求解过程中，会生成两个**收敛**图，您可以通过**图形**窗口旁边的选项卡进行访问。这些绘图显示了**研究**中采用的不同求解器算法的收敛进度。

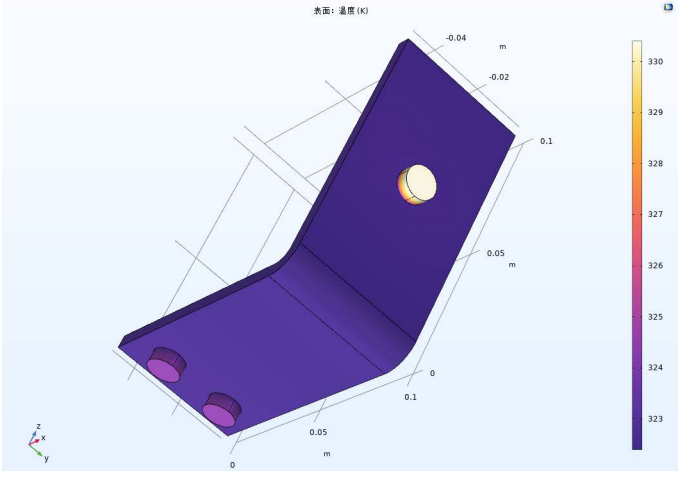
结果

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**多切面上的流线**图，以及**温度**的**体**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，设备中的温差不超过 10 K。温度变化最大的部位是顶部螺栓，其电流传导量是两个底部螺栓的两倍，温度明显高于环境温度 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。

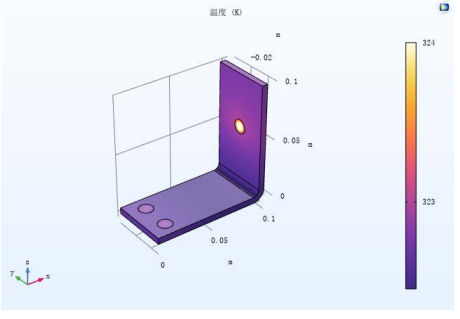
3 在模型树中展开**结果** > **温度**节点 ，然后单击**体**节点 。

4 在**体**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**体**的**设置**窗口中，单击**绘制**按钮 。

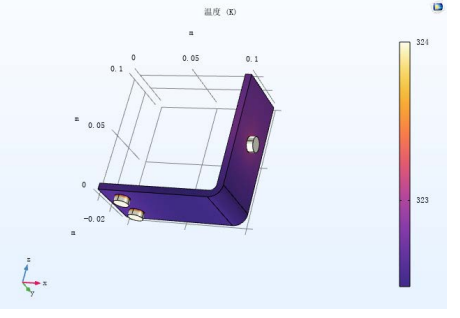


5 在**图形**工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮 ，查看更新的绘图。

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。



5



6

温度分布呈现出横向对称性，一个垂直的镜像平面在底部两个钛螺栓之间延伸，并穿过顶部螺栓的中心。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，可以考虑利用对称性来减少计算需求。

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**电流密度**（即之前的**三维绘图组 4**），并添加**表面**节点。



2 在**表面设置**窗口的**表达式**栏中，单击**替换表达式**按钮。转到**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` 是电流密度矢量的大小或绝对值的变量。如果您知道变量名称，也可以在**表达式**框中键入 `ec.normJ`；此外，您也可以使用自动补全功能，只需键入 `norm` 后按下 Ctrl+/，即可获得变量名称的建议。



3 单击**绘制**按钮。

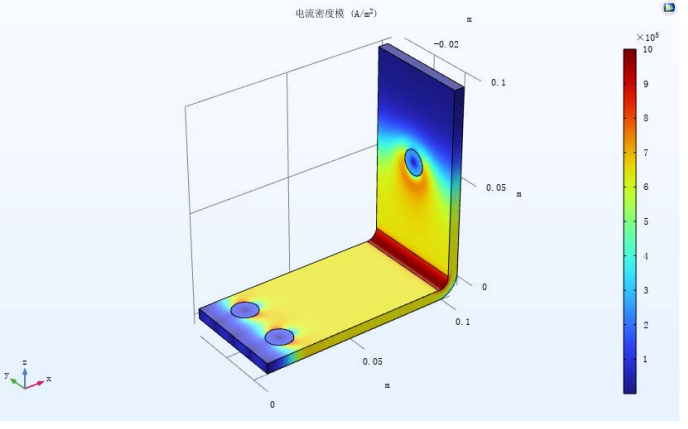
由于同螺栓接触的边上具有较高的电流密度，因此**图形**窗口中显示的绘图颜色几乎是均匀的。下一步是手动更改颜色表范围，以便生成电流密度分布的可视化效果图。

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。

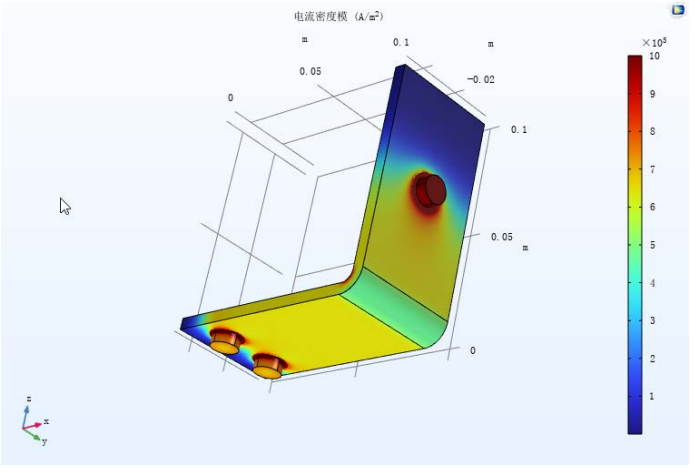


5 单击**绘制**按钮 。

生成的绘图显示，电流在母线板 90 度弯曲处选择了最短路径。需要指出的是，螺栓外侧的母线板几乎没有电流通过。



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，查看每个螺栓接触面周围的高电流密度。



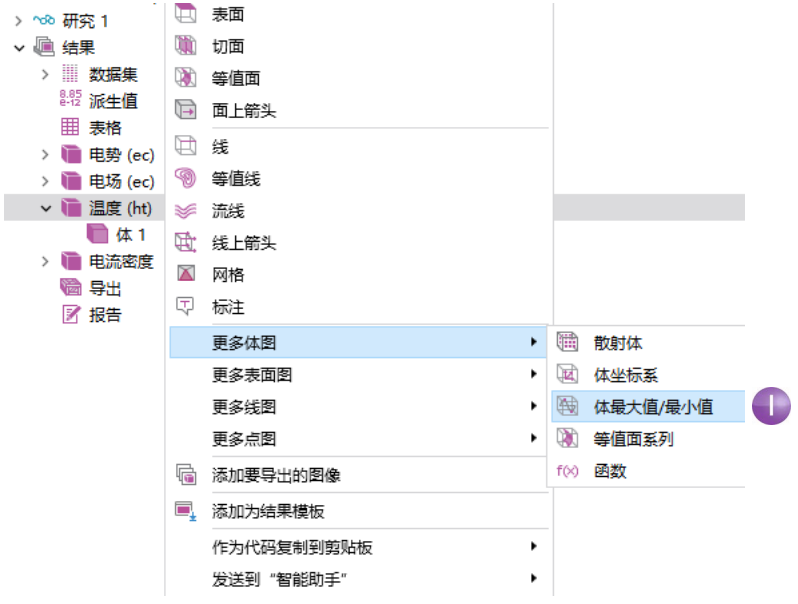
6

完成后，单击**图形**工具栏中的**切换到默认视图**按钮 。

获取最高和最低温度

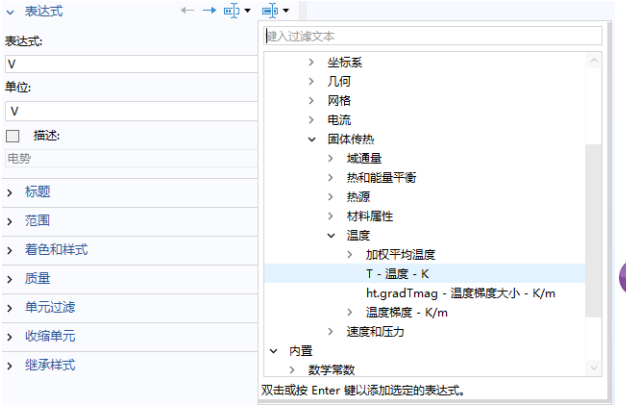
您可以轻松获取母线板中的最高和最低温度值，以及这些温度值在母线板中的具体位置。

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

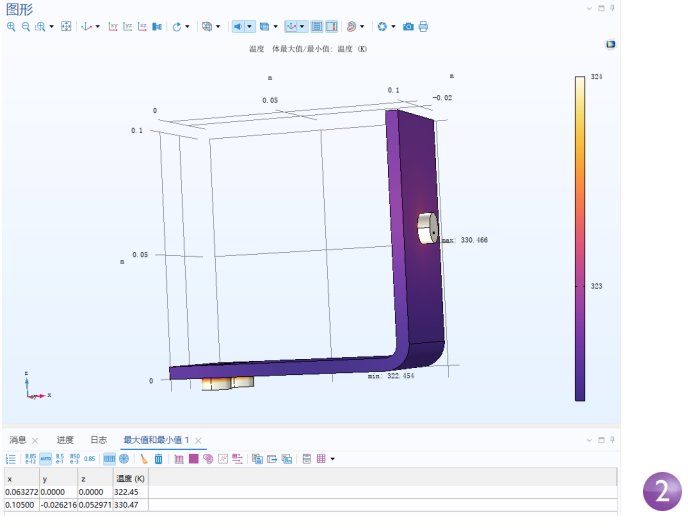


2 在**体最大值 / 最小值设置**窗口的**表达式**栏下，单击**替换表达式**按钮 。转到**模型** > **组件 1** > **固体传热** > **温度** > **T - 温度 - K**，然后双击或按 Enter 进行选择。

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**表中显示这些值及其位置。这些值根据您运行的软件版本可能会略有不同。不过，对于更细的网格，不论是哪个版本，得到的结果都相同。

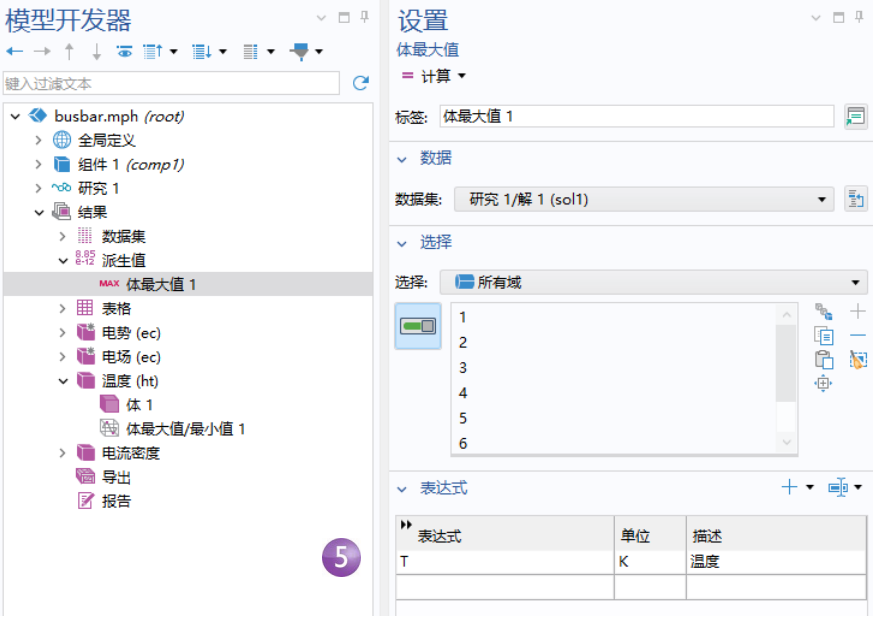


除上述绘制最大值和最小值的方法以外，您还可以使用**派生值**节点或**计算组**来获取纯数值输出。以下步骤演示如何使用**派生值**。

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。

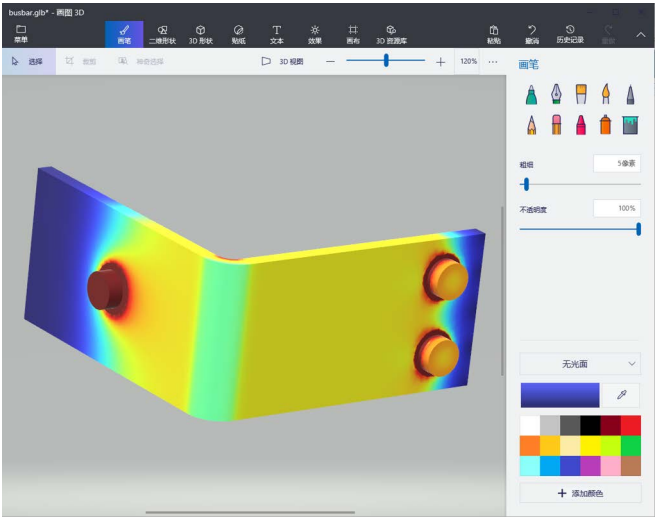
基于绘图创建模型图像

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。您只需右键单击所需的绘图组，然后选择**添加要导出的图像**即可。



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“画图 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，此功能可能已内置于您的系统中。否则，您可以从 Microsoft® Store 下载。）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。这个版本的模型 `busbar.mph` 将在后续的多个教程中被重复使用并重新命名。另外，对于未来的教程，您也可以从“案例库”的 **COMSOL Multiphysics** > **多物理场**分支下获取母线板文件。

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，并以母线板模型为例进行演示。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分布图。

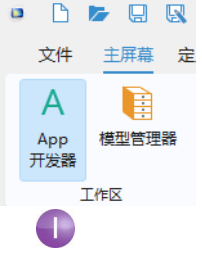
您将学习如何使用“新建表单”向导、通过两种不同的布局模板、以两种不同的方式来快速创建 App。该向导用于创建一个或多个包含用户界面组件（称为“表单对象”）的表单，可供您快速访问“App 开发器”中可用于创建 App 的所有表单对象的子集。在接下来的示例中，您将学习如何添加输入框、数值输出、图形和按钮。如需有关开发 App 的详细信息，请参阅《App 开发器简介》手册。

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。该模板简化了通过拖动来交互地移动按钮和编辑文本框的过程。然而，在更改 App 窗口的大小时，无法灵活调整图形的大小。第二个示例则演示如何使用**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 119 页的“示例 2”时保存了模型，也可以打开已保存的 `busbar.mph` 文件。

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**单个表单**。



单击**内容**继续进行操作。

此时会显示**选择内容**页面。



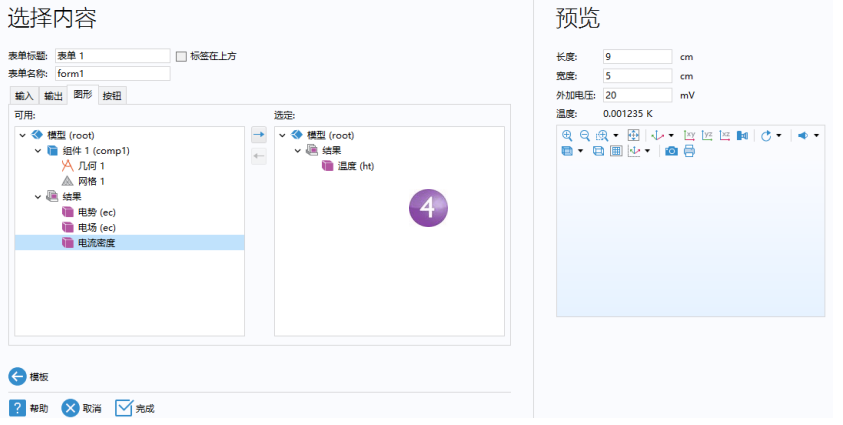
页面中包含四个选项卡：**输入**、**输出**、**图形**和**按钮**。您可以在**输入**选项卡中双击树状结构中的参数，使其显示在 App 的用户界面中。对于此 App，我们将选择一些参数作为输入，并选择最高温度作为输出。

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)**。同时，在**输出**选项卡中，双击**派生值**下的**体最大值**。

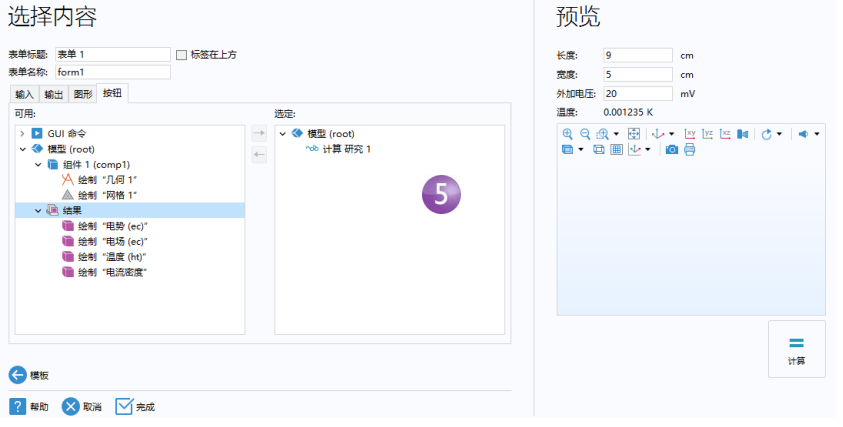


右侧的**预览**栏会显示用户界面布局。

4 在向导中单击**图形**选项卡，并双击**温度**图。**预览**区域将出现一个图形对象占位符。

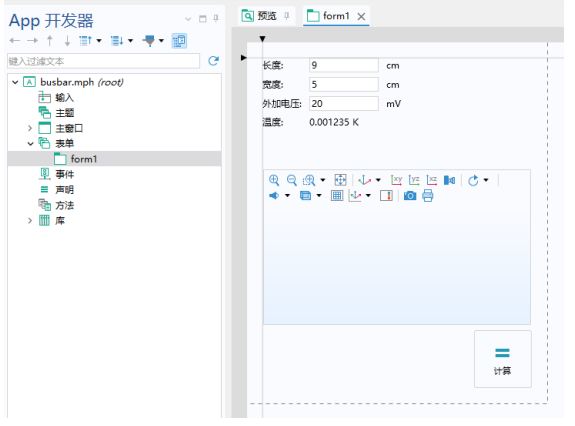


5 单击向导中的**按钮**选项卡，然后双击**计算研究**。此时，**计算**按钮会显示在**预览**区域中图形对象的下方。



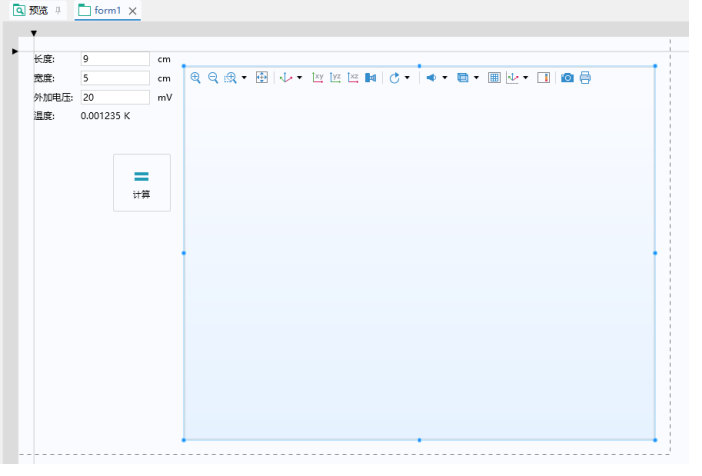
6 最后，单击**完成**以接受设置并关闭向导。

关闭 “表单”向导后，“App 开发器”工作区中会打开 “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。



6

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，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。



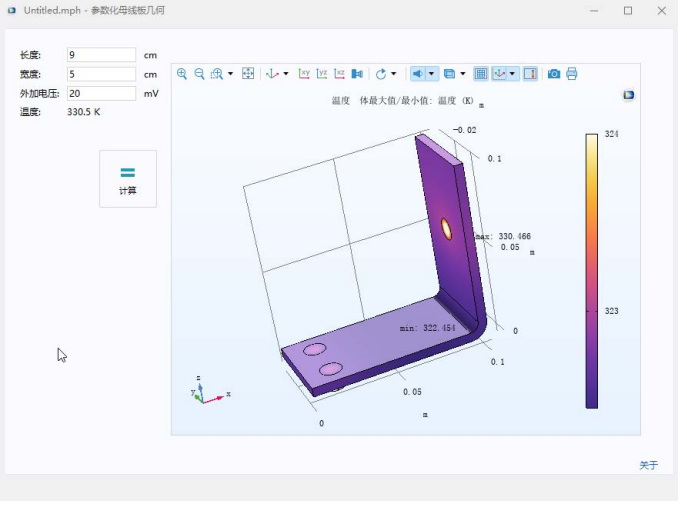
7

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。



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，可供您在运行 App 的过程中快速尝试不同的设计。



9 现在，您可以尝试不同的**长度**值，然后单击**计算**。

添加按钮

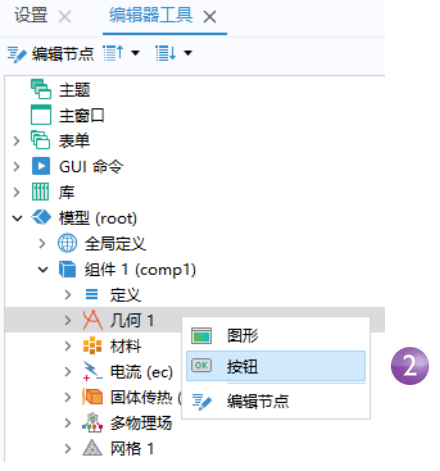
建议您在开始计算之前先预览几何，这可以通过添加按钮来轻松实现。您可以通过以下两种方式来添加按钮：单击功能区的**表单**选项卡的**表单对象**栏中的**按钮**（如下图所示）；或者使用**编辑器工具**窗口。在本例中，我们使用第二种方法。



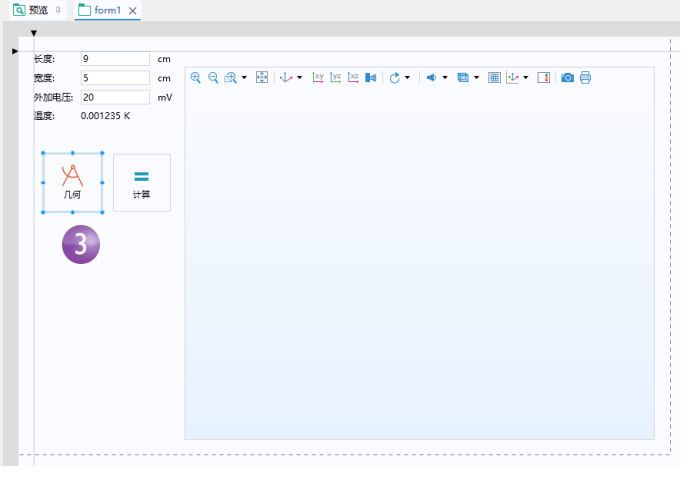
1 首先，通过选择功能区**主屏幕**选项卡中的相应按钮，确保**编辑器工具**窗口可见。



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。

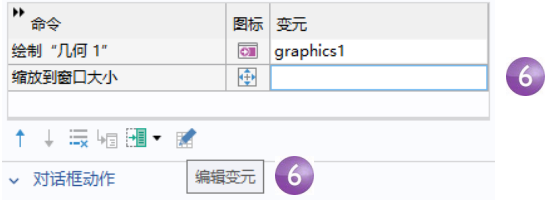


在这个例子中，**几何**的命令序列包含一个用于绘制几何的命令，其输入变元包含将几何绘图发送到哪个图形窗口的相关信息。本例中的图形对象为 `graphics1`。

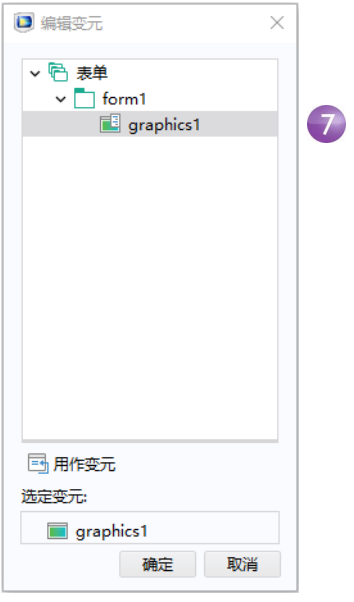
要自动调整轴设置，可以添加**缩放到窗口大小**命令。

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。

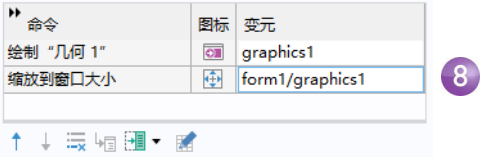
6 接下来，为**缩放到窗口大小**命令创建输入变元。单击**缩放到窗口大小**旁边的空白编辑框，然后单击**编辑变元**按钮。



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。

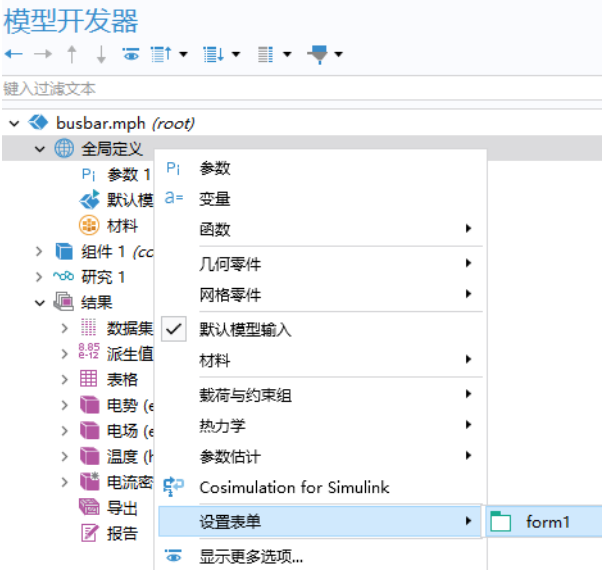


9 为确保新的**几何**按钮正常工作，您可以单击功能区中的**测试 App**，再次对 App 进行测试。

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规任务或重复性工作创建定制的**设置**窗口。如果您希望在多个会话之间重用这些定制的**设置**窗口，甚至将其分享给其他用户，可以按照 《App 开发器简介》中的说明创建一个插件。

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。

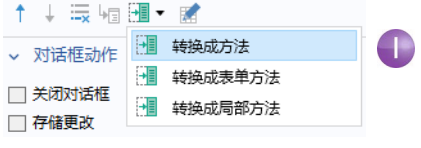


方法

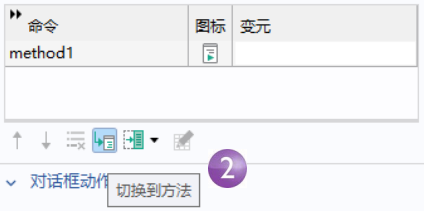
当您需要执行一些命令序列无法实现的更高级操作时，可以使用“方法编辑器”来编写代码，定义用户在执行单击按钮、选择菜单项等操作时要执行的动作。除了从 App 或**设置表单**中调用方法以外，您还可以从功能区的**开发工具**选项卡或模型树的**方法调用**中调用方法。有关更多信息，请参见 《App 开发器简介》。

轻松上手 “方法编辑器”的方法之一是将现有的命令序列转换成一个方法。

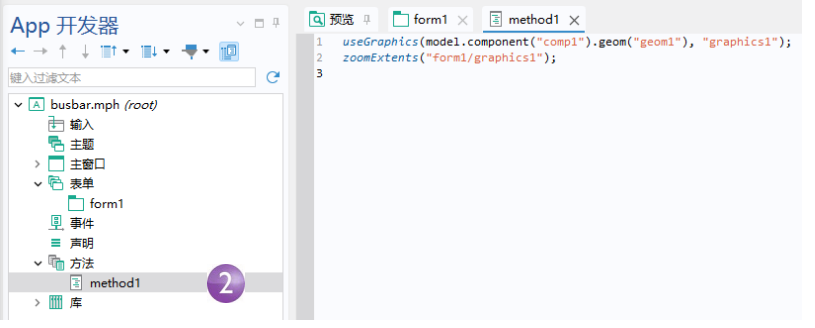
1 在 “App 开发器”中，再次找到或打开**几何**按钮的**设置**窗口。在命令序列下方的菜单中选择**转换成方法**。（下拉菜单中的其他两个选项用于创建两种类型的局部方法。）



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”。

JAVA SHELL & 智能助手窗口

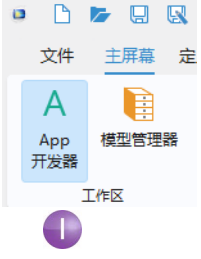
请注意，除了 “方法编辑器”外，您还可以使用 **Java Shell** 窗口来运行代码。该窗口可通过 “模型开发器”工作区访问，您可以使用 Java 代码与模型进行交互。在调试方法时，您还可以访问断点处的变量内容。同时，您还可以通过**智能助手**窗口与聊天机器人进行交互，获取有关使用 Java 语法、调试代码等方面的提示。有关更多信息，请参见 《App 开发器简介》和 *Application Programming Guide*。

使用基本模板创建 APP

第二个示例演示如何使用**基本**模板来创建一个包含多个表单和子窗口，以及一个功能区的 App。使用该模板创建的 App 具有可调整大小的图形窗口。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，使用模板可以加快这一进程。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 119 页的 “示例 2” 时保存了模型，也可以打开已保存的 `busbar.mph` 文件。

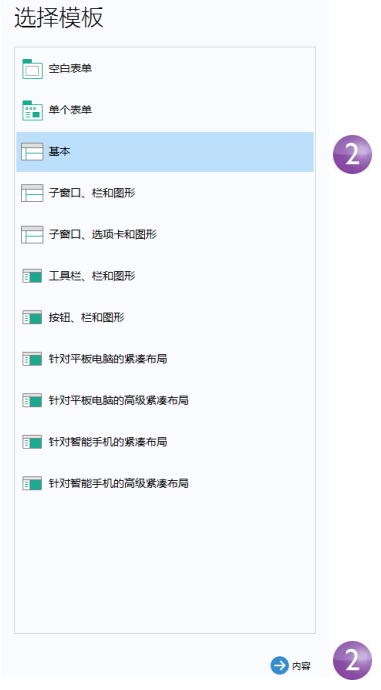
1 要从 “模型开发器” 切换到 “App 开发器”，可以在功能区中单击**主屏幕**选项卡最左侧的**工作区**栏中的 **App 开发器**按钮。



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**基本**。



单击**内容**继续进行操作。

此时会显示**选择内容**页面。



与使用**单个表单**模板的情况类似，此页面包含四个选项卡：**输入**、**输出**、**图形**和**功能区按钮**。在**输入**选项卡中，您可以双击树状结构中的参数，使其显示在 App 用户界面中。与之前使用**单个表单**模板的示例操作方式相同，在**输入**选项卡中依次双击以下参数：**长度 (L)**、**宽度 (wbb)** 和**外加电压 (Vtot)**。接着，在**输出**页面中，双击**派生值**下的**体最大值**。

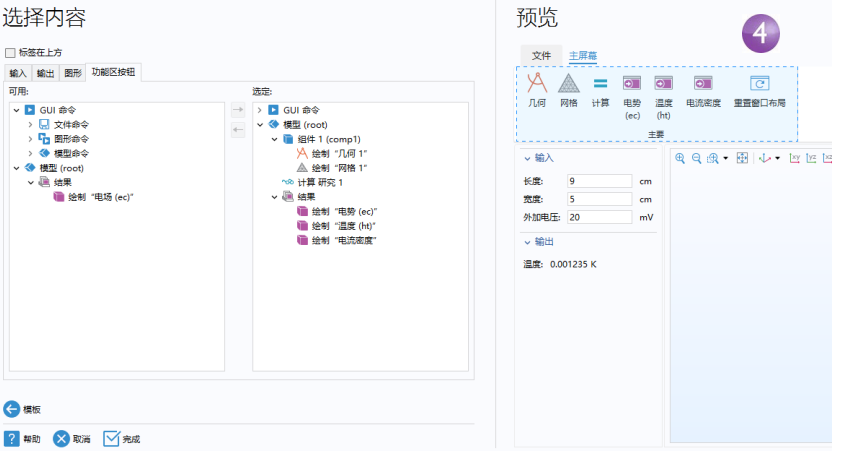
3 继续单击向导中的**图形**选项卡，然后双击**温度**图。



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，添加了与以下操作对应的按钮：**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**以及**重置窗口布局**。

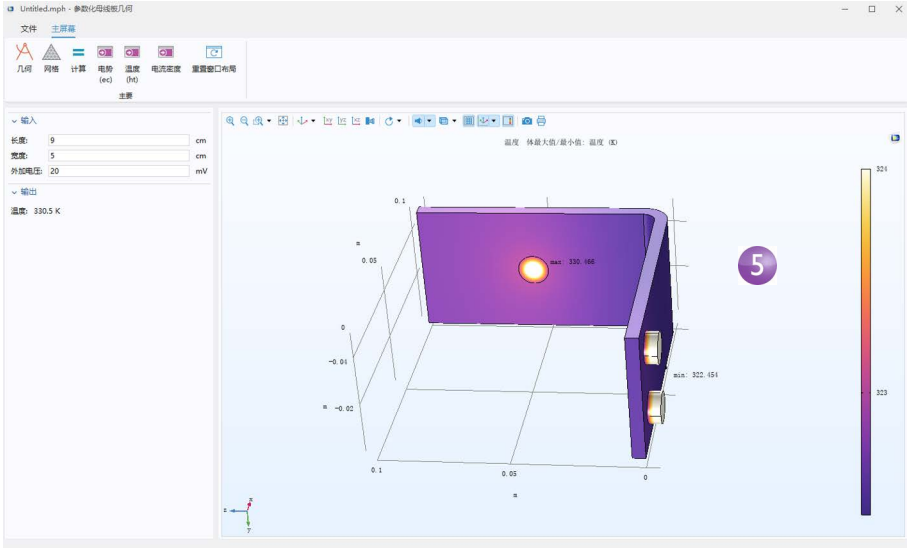


重置窗口布局选项可以在 **GUI 命令** > **主窗口命令** > **重置窗口布局**中找到。该 App 由两个子窗口构成，一个用于输入输出，另一个用于图形显示。**重置窗口布局**按钮会将 App 中两个可调整大小的子窗口重置为其原始大小。**子窗口**模板与**基本**模板相似，但提供了分离、移动和停靠子窗口的功能。在本例中，**重置窗口布局**操作会将所有子窗口重新排列为其原始位置和大小。

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

单击**完成**以退出向导，软件会自动跳转到 “主窗口编辑器”。

5 您可以单击功能区中的**测试 App** 进行测试。



想要深入了解如何使用 “表单编辑器”和 “方法编辑器”，请参阅 《App 开发器简介》一书，其中提供了有关编写方法的详细信息。如需进一步掌握方法相关知识，请参阅 *Application Programming Guide* 和 *Application Builder Reference Manual*。

母线板示例到此结束。如需切换回 “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

接下来的章节将帮助您加深对当前已实施步骤的理解，并进一步扩展仿真范围，涵盖热膨胀、流体流动等附加效应。相关内容将在后续页面中展开：

- 第 137 页的 “参数、函数、变量与耦合”
- 第 142 页的 “材料属性和材料库”
- 第 144 页的 “添加网格”
- 第 147 页的 “添加物理场”
- 第 170 页的 “参数化扫描”
- 第 182 页的 “并行计算”
- 第 186 页的 “COMSOL Multiphysics 客户端 – 服务器”
- 第 215 页的 “附录 A—— 构建几何”

参数、函数、变量与耦合

本节将介绍参数、函数、变量以及非局部耦合的使用方法。

在**全局定义**和**组件** > **定义**节点中，您可以准备模型输入与非局部耦合，并高效组织仿真任务。例如，在第 85 页的“全局定义”一节中，您已经使用该功能通过添加参数组织了模型输入。

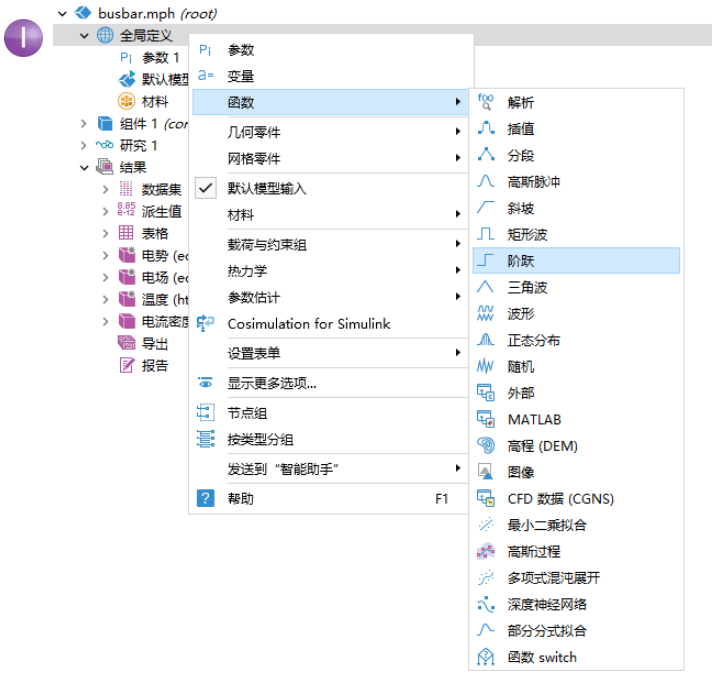
全局定义和**组件** > **定义**中的函数包含一系列预定义的函数模板，它们能够帮助您更便捷地设置多物理场仿真。例如，**阶跃**函数模板可用于创建平滑的阶跃函数，以定义不同类型空间或时间上的过渡过程。

为便于理解函数的应用，我们以母线板模型为例：假设需要添加瞬态研究，使施加在母线板上的电势在 0.5 秒内从 0 V 平滑上升至 20 mV。此时，可以通过阶跃函数乘以参数 `Vtot` 来实现。在本节中，您将在模型中添加一个在 0.5 秒内从 0 平滑过渡到 1 的阶跃函数，并学习如何定义并验证该函数。

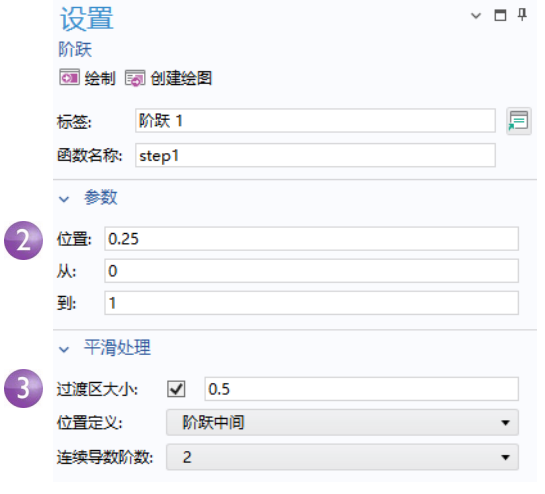
定义函数

在本节中，您可以继续使用上一节创建的模型文件。如果第 119 页提到的 `busbar.mph` 文件尚未在桌面上打开，请找到并打开它。

1 右键单击**全局定义**节点 并选择**函数** > **阶跃** 。



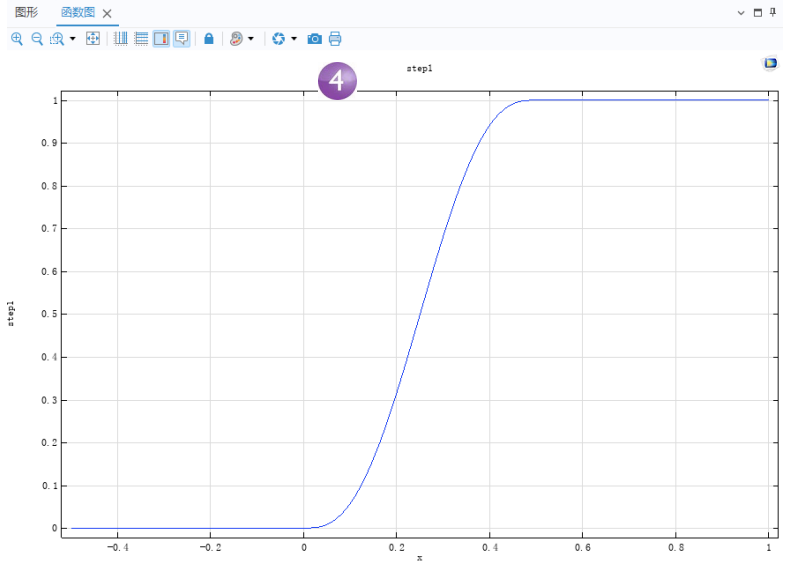
2 在**阶跃设置**窗口的**位置**框中，输入 0.25，以设置值为 0.5 的阶跃函数中心的位置。



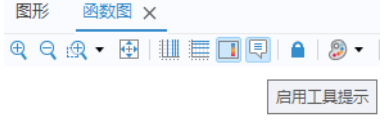
3 单击**平滑处理**以展开该栏，并在**过渡区大小**框中输入 0.5，以设置平滑区间的宽度。保留默认的**连续导数阶数**为 2，以及**位置定义**的设置。

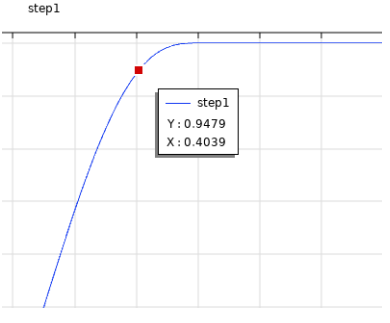
4 在**阶跃**的**设置**窗口中，单击**绘制**按钮 。

如果得到的绘图与下图相符，说明您已正确定义该函数。



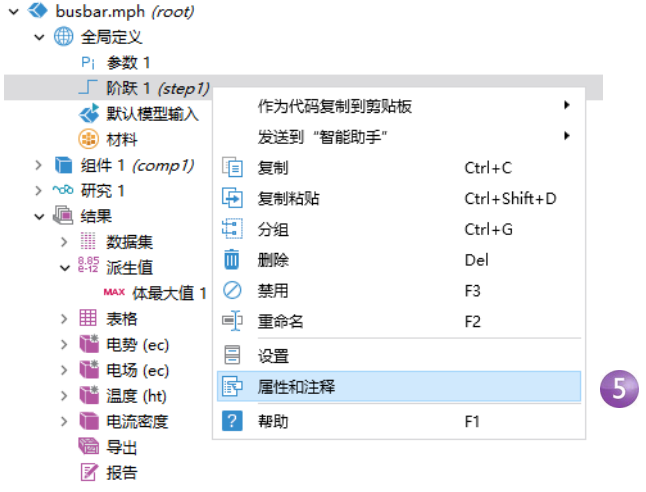
您可以启用交互式工具提示，以便在将光标悬停在图表上时显示数据值。您可以通过**图形**工具栏中的**启用工具提示**按钮 （默认打开）来控制此功能的启用与否。





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，并选择**属性和注释**。



6 在**属性**窗口中输入所需的信息。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。

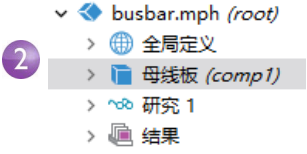


为了达到本次练习的目的，假设您要引入其他组件，例如，另一个通过钛螺栓连接到母线板的电气设备。

在这种情况下，较好的做法是为每个组件提供一个描述性的名称。现在，重命名**组件 1**，指定其表示母线板。

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，并可以作为馈给电气设备（作为第二个组件建模）的电流的边界条件等。



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 170 页的 “参数化扫描” 中找到使用平均算子的示例。另请参见第 246 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。

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”附加产品包含 15000 多种材料以及数十万种材料属性。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。

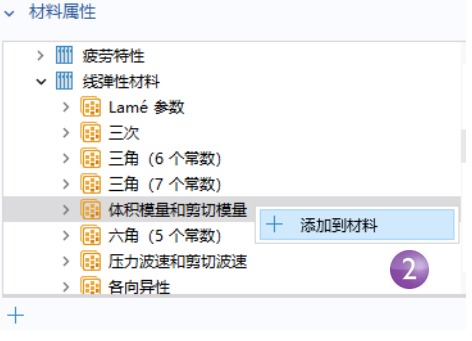
1 在**模型开发器**窗口的**材料**节点下，单击 **Copper** 。



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。

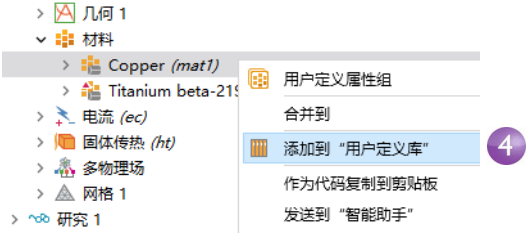


3 在 **Copper** 节点中，定位到**材料属性明细**栏。此时可以在表格中看到**体积模量**和**剪切模量**行。警告符号 ⚠ 表示值尚未定义。要定义值，您可以单击**值**列，然后在**体积模量**行中输入 140e9，并在**剪切模量**行中输入 46e9。



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。

模型组件可以包含不同的网格序列，用于生成具有不同设置的网格。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，以创建更粗的网格（具有更大的单元）。

添加网格

1 打开之前在第 119 页保存的模型 `busbar.mph`。

2 为了将此模型保存在一个单独的文件中以便稍后使用，可以选择**文件** > **另存为**，并将该模型重命名为 `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 137 页的“参数、函数、变量与耦合”中的操作说明，则名称不是**组件 1**，而是**母线板**。）



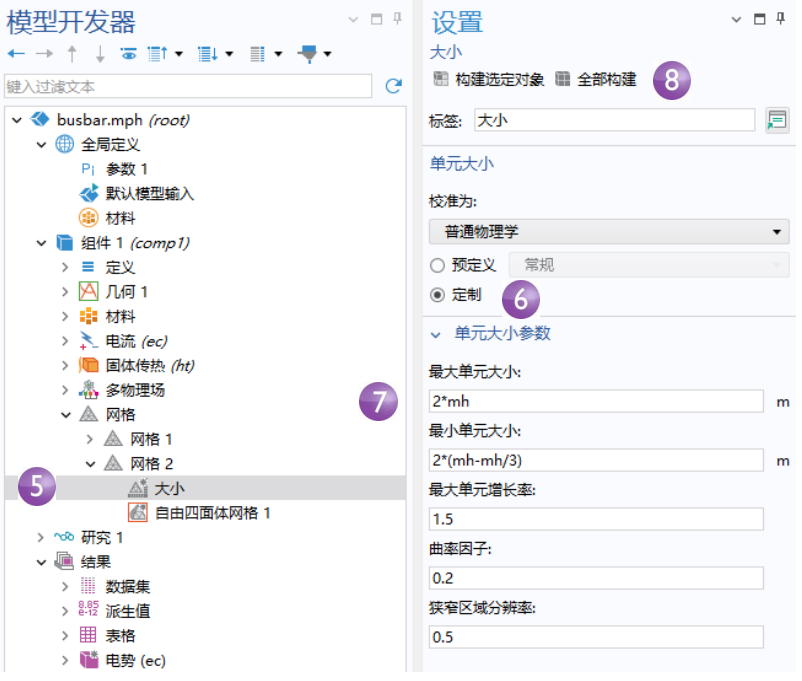
通过添加另一个**网格**节点，可以创建一个同时包含**网格 1** 和**网格 2** 的**网格**父节点。

4 单击**网格 2** 节点，并在**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 首先，删除额外的**大小 1** 节点（用于控制边界网格）。然后，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。

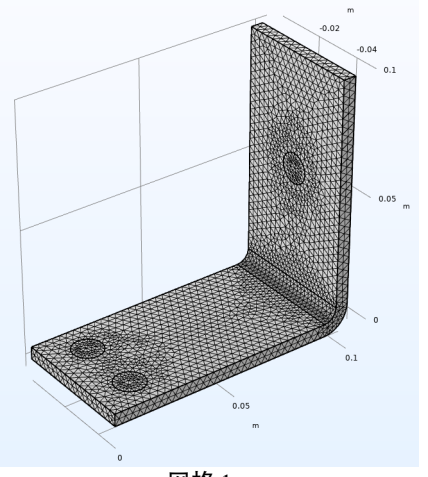
6 在**大小设置**窗口的**单元大小**栏中，单击**定制**按钮。

7 定位到**单元大小参数**栏：

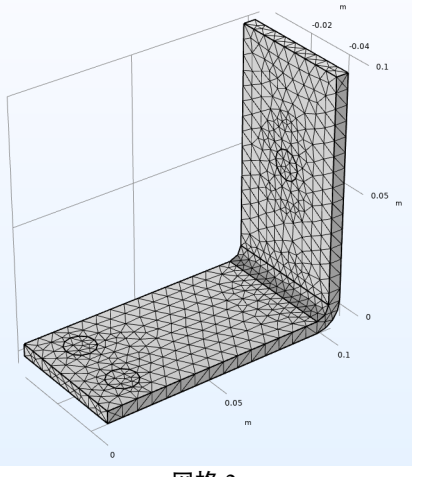
- 在**最大单元大小**框中输入 `2*mh`，其中 `mh` 为 3 mm—— 先前定义的网格控制参数。
- 在**最小单元大小**框中输入 `2*(mh-mh/3)`。
- 在**曲率因子**框中输入 `0.2`。

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 85 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

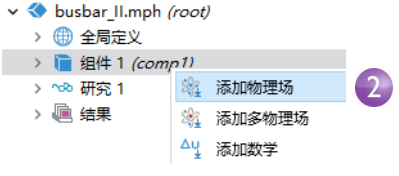
完成母线板焦耳热仿真后，我们了解到母线板会升温。那么，热膨胀会引起什么样的机械应力呢？为了回答这个问题，让我们展开模型，加入与结构力学相关的物理场。

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 156 页的“添加流体流动进行冷却”一节。

1 打开之前在第 119 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。

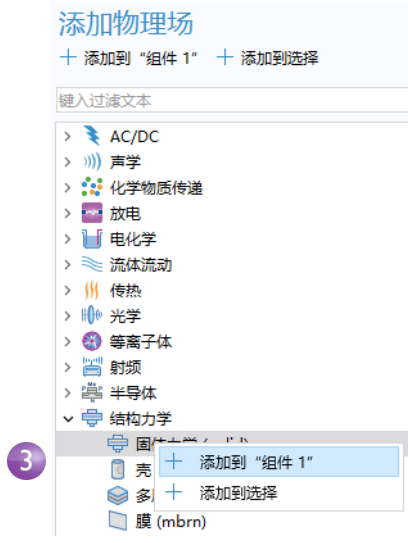
2 在**模型开发器**窗口中，右键单击**组件 1** 节点 并选择**添加物理场** 。



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。

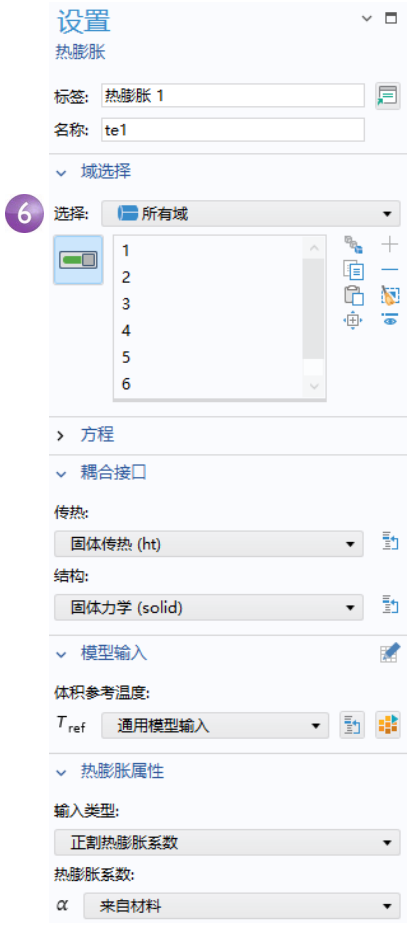
您也可以使用功能区，从**物理场**选项卡中选择**多物理场耦合** > **热膨胀**。



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。

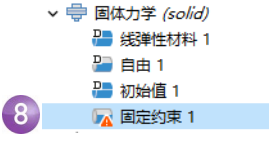
此窗口的**热膨胀属性**栏显示有关热膨胀系数和应变参考温度的信息（还提供一些更高级的设置）。**热膨胀系数**从**材料**节点中取值。在**模型输入**栏中，**体积参考温度**（应变参考温度）的默认值为 293.15 K（室温），取自**通用模型输入**，本例中对应于**全局定义**下的**默认模型输入**节点，用于定义不发生热膨胀时的温度。**耦合接口**栏显示哪两个物理场接口用于定义传热和固体力学的物理场。当模型组件中包含多个传热或固体力学的物理场接口时，此设置非常有用。保留此窗口中的所有默认设置。

接下来，我们在钛螺栓位置对母线板施加约束。

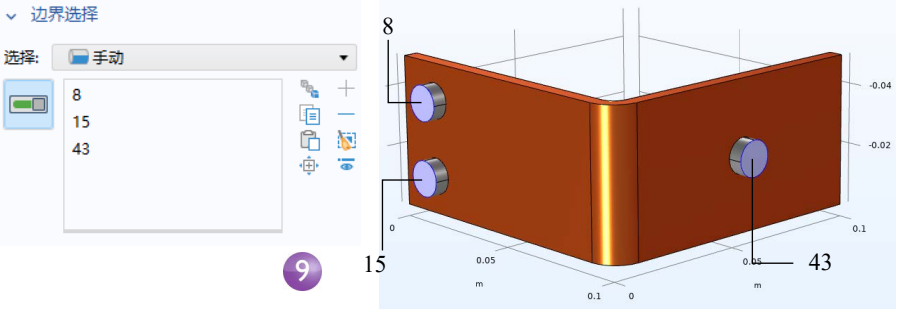


7 在模型树中，右键单击**固体力学**，然后从边界层中选择**固定约束**。同名的节点会添加到模型树中。

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。

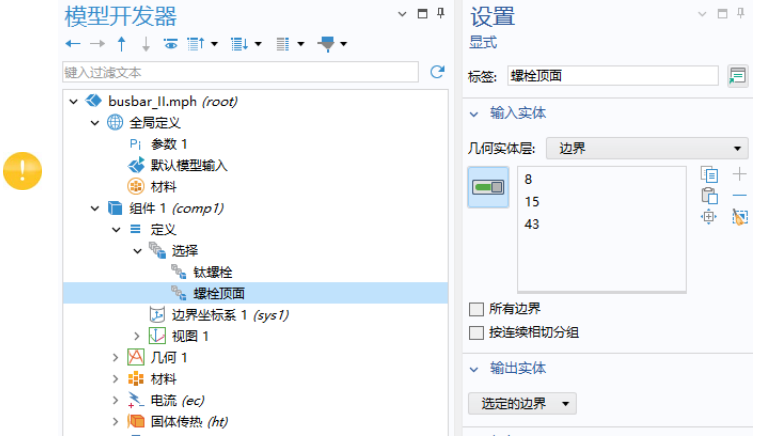


9 对其余螺栓重复此操作过程，添加边界 8、 15 和 43。



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，如**螺栓顶面**。

此选择随后会作为节点添加到**组件 1** > **定义**下，并支持从所有类型边界条件的**设置**窗口的**选择**列表中进行访问。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。

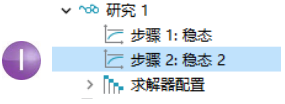
求解焦耳热和热膨胀

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。

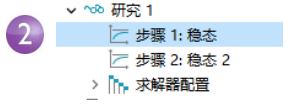
对于本例，可以跳过这些步骤，直接单击**计算**。不过，以下技巧对节省计算时间和内存资源很有帮助，尤其适用于较大规模的仿真。

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。



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)**。

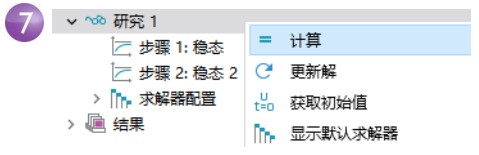
5 在**研究 1** 节点下，单击**步骤 2：稳态 2**。



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。

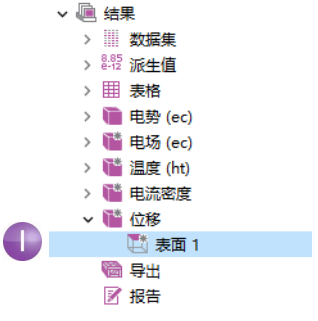


将文件另存为 `busbar_II.mph`，此时其中包含**固体力学**接口和附加的研究步骤。

结果变形

现在已添加物理场接口，需要手动添加额外的**固体力学**绘图。首先添加位移图。

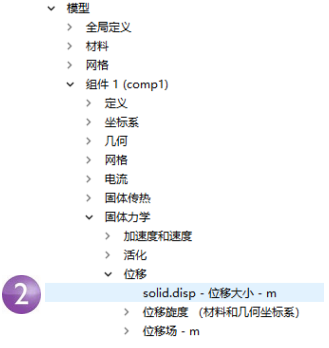
1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**结果** 并添加**三维绘图组**。在**标签**框中输入**位移**，为绘图组提供一个描述性名称。右键单击**位移** 并添加**表面 1** 节点。单击**表面 1** 节点。



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**。

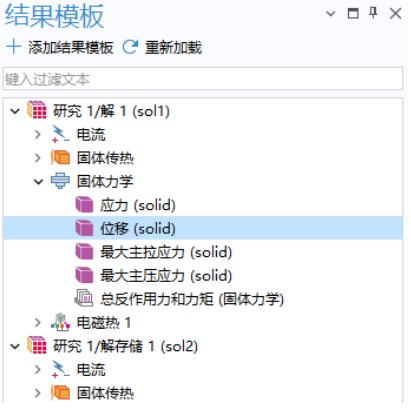


此外，您也可以在**表达式**框中输入 `solid.disp`。

接下来，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。

此外，您也可以使用**结果模板**窗口来添加**位移**图。

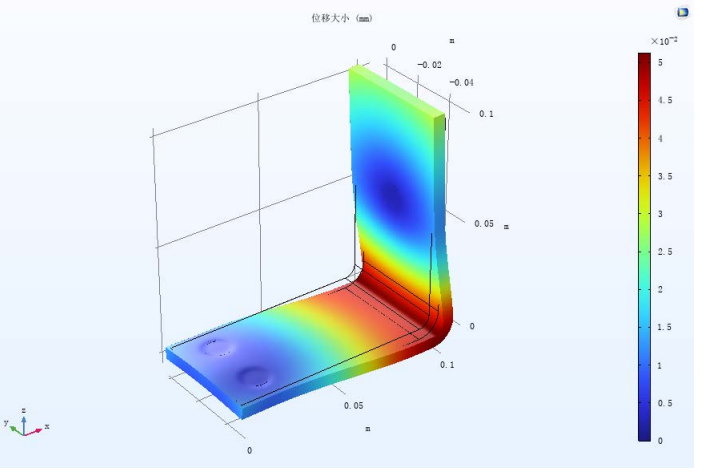


接下来，我们将添加母线板变形的相关信息。

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 。**图形**窗口中的绘图会自动更新。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。

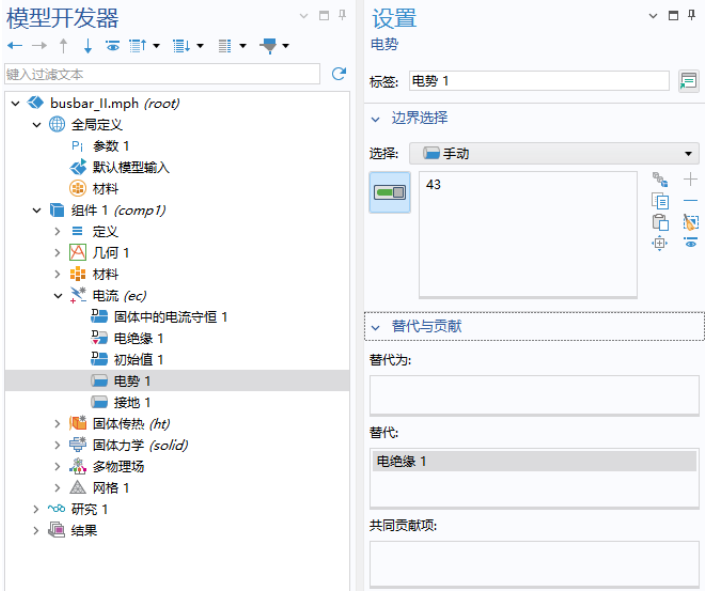
您还可以通过绘制 von Mises 应力和主应力，评估母线板和螺栓的结构完整性。

替代与贡献：独占和贡献节点

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

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**替代与贡献**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）是贡献节点的典型示例。您可以堆叠多个热通量边界条件，它们都将成为总热通量的组成部分。在下图显示的示例中，**热通量 2** 边界条件替代了默认的**热绝缘**边界条件，并与**热通量 1** 一同对热通量产生影响。



在模型树中，替代与贡献关系分别由红色箭头和橙色的圆来表示。

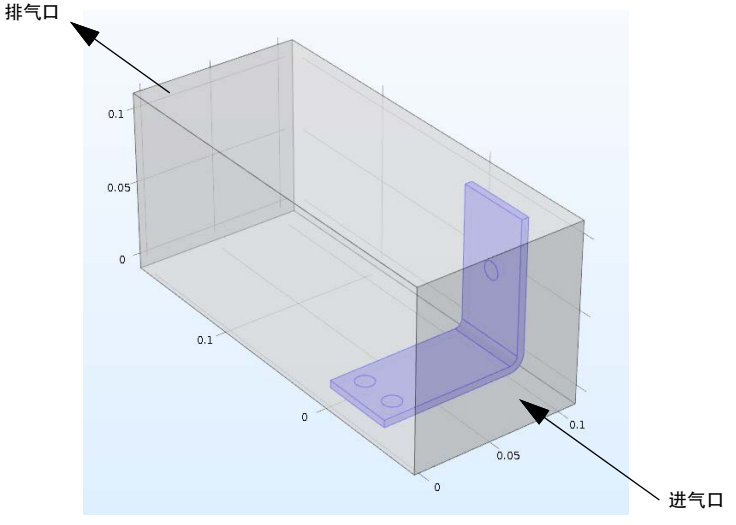
添加流体流动进行冷却

在分析母线板中生成的热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，且功能受限，只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域。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域的文件。

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）：



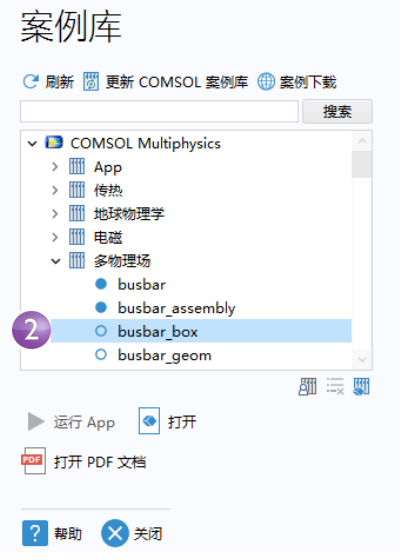
定义入口速度

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。

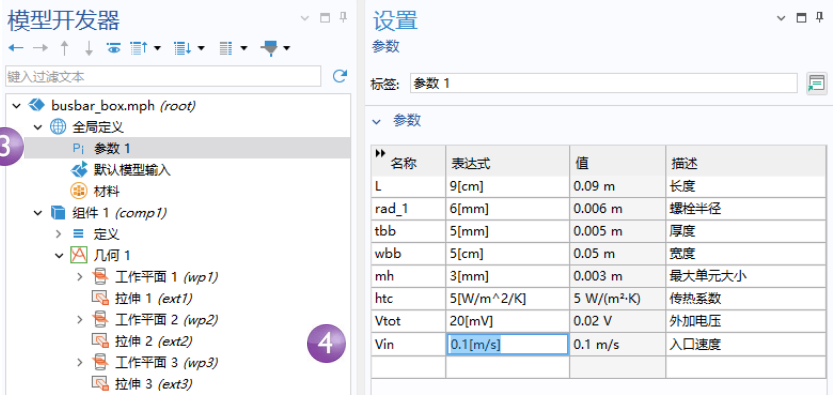
2 单击**主屏幕**选项卡，从**窗口**菜单中选择**案例库** 。导航至 **COMSOL Multiphysics** > **多物理场** > **busbar_box**。（您也可以从**文件**菜单直接打开“案例库”。）

双击以打开文件，其中包含几何以及截止第 142 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 。

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**。



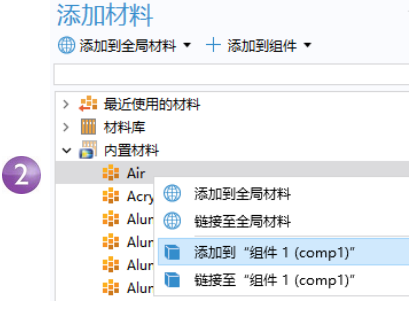
5 选择**文件** > **另存为**，并使用新名称 busbar_box_I.mph 来保存模型。

添加空气

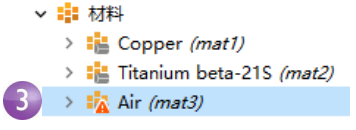
下一步是添加空气的材料属性。

1 从**主屏幕**选项卡中选择**添加材料**（或者右键单击**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。

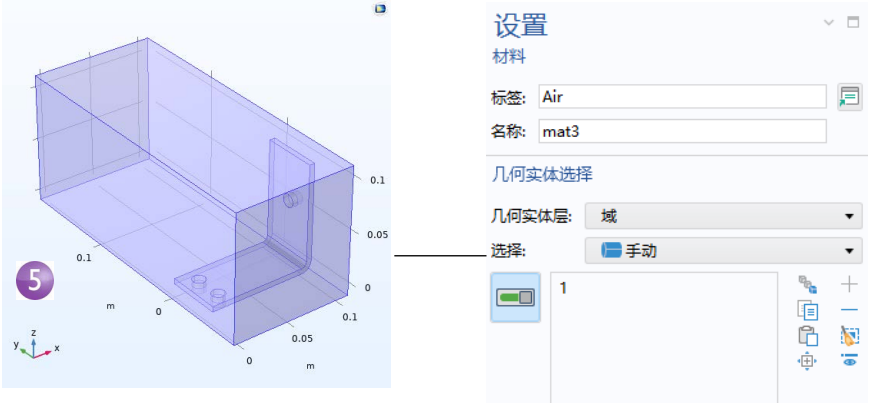


3 在**模型开发器**窗口的**材料**下，单击 **Air** 节点。



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，单击空气域（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域。

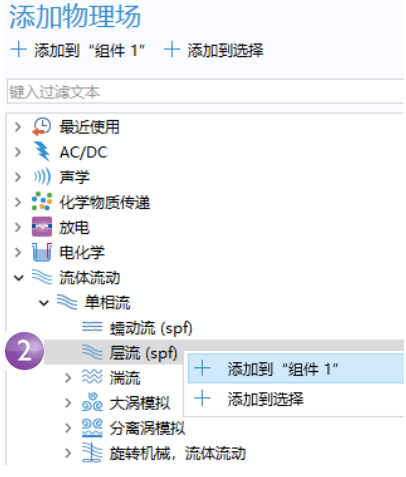


添加流体流动

接下来，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**。

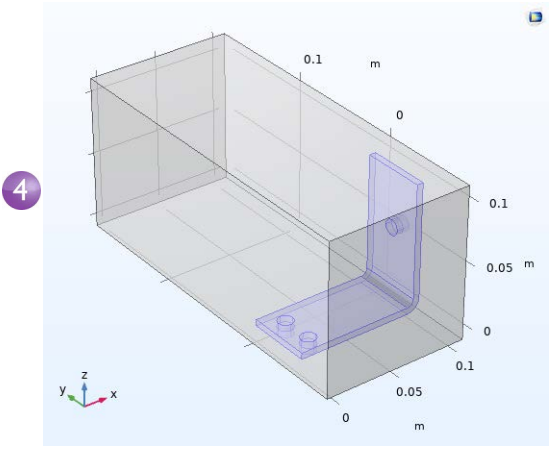
2 在**添加物理场**窗口的**流体流动** > **单相流**下，右键单击**层流** 并选择 **添加到组件**。**层流**将显示在模型树的**组件 1** 节点下。关闭**添加物理场**窗口。



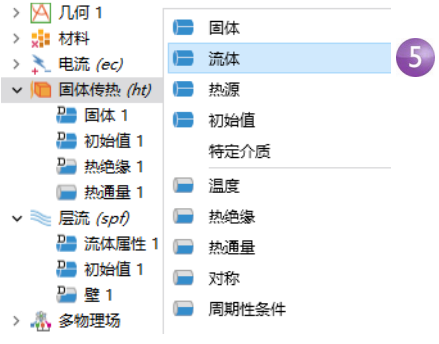
3 在**图形**工具栏中，单击**透明度**按钮。然后单击**线框渲染**按钮。这两个设置使我们更容易查看框的内部。在建模过程中，您可以根据需要来打开或关闭这些设置，控制所用的渲染类型。

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。

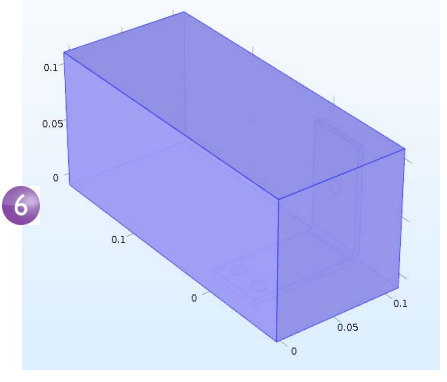


5 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体传热** 。在上下文菜单的第一栏（域层 ），选择**流体**。



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。

下面，我们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。

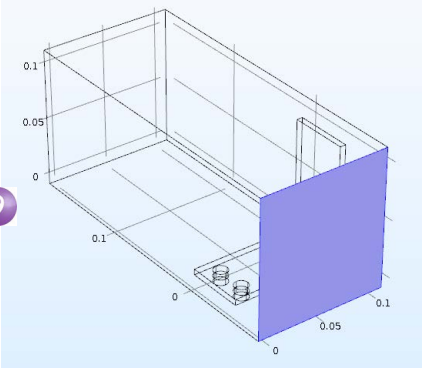


9 在**图形**窗口中，单击入口边界（边界编号 2），将其添加到**选择**列表中。

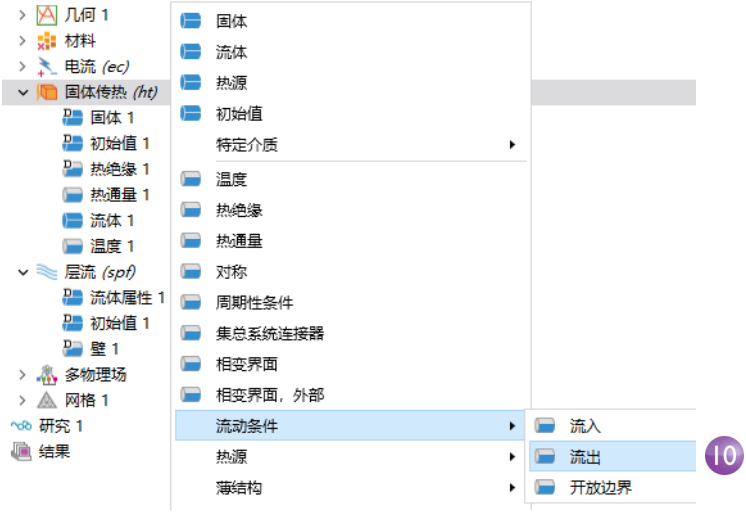
此操作可以将入口温度设为默认设置 293.15 K。

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

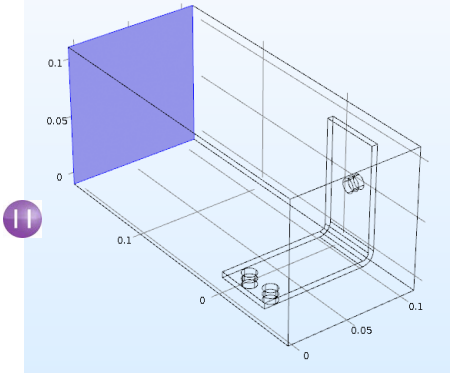
接下来，继续定义出口。



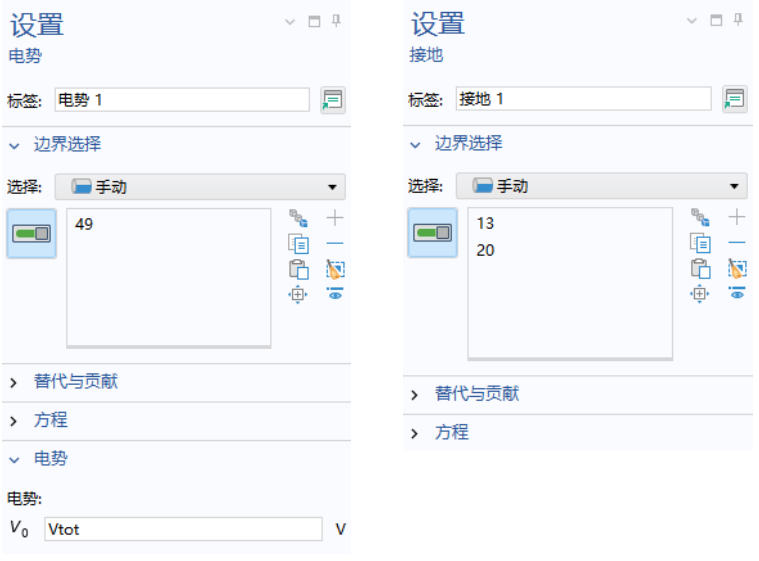
10 在**模型开发器**窗口中，右键单击**固体传热** 。在边界层，选择**流动条件** > **流出**。**流出**节点 会添加到模型树中。



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。

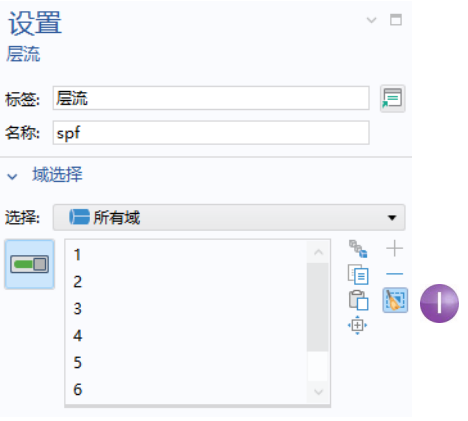


即使为空气域添加了框几何，母线板、螺栓、**电势 1** 和**接地 1** 边界的设置也都保留了正确的选择。为了证实这一点，您可以在模型树的**电流**节点下单击**电势 1** 和**接地 1** 节点，确认其边界选择正确。

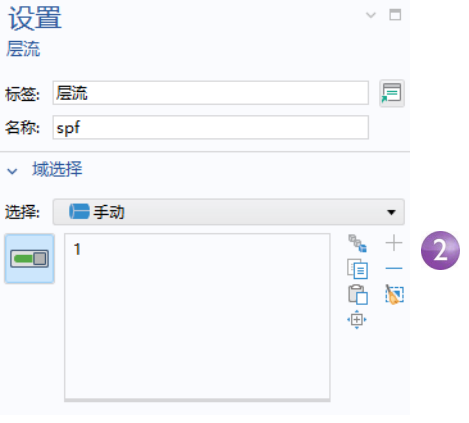


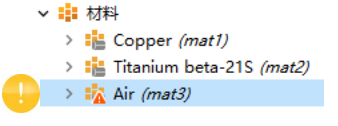
接下来，继续设置流动属性。您需要指明流体流动仅发生在流体域中，然后设置入口、出口和对称条件。为此，首先从选择中移除所有域，然后添加空气域。

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，单击空气域 （域 1）将其添加到**选择**中。

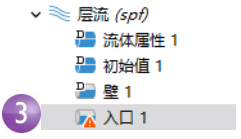




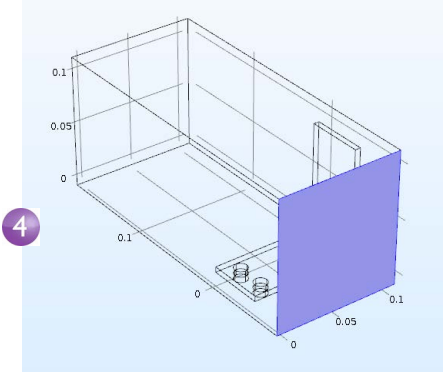
比较好的做法是，确认**材料**节点下的 **Air** 材料是否具有此多物理场组合所需的所有属性。在模型树的**材料**下，单击 **Air**。在**材料设置**窗口的**材料属性明细**栏中，确认不缺少任何属性，即没有带警告符号 的项。请参见第 93 页的 “材料” 章节，了解更多信息。

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。

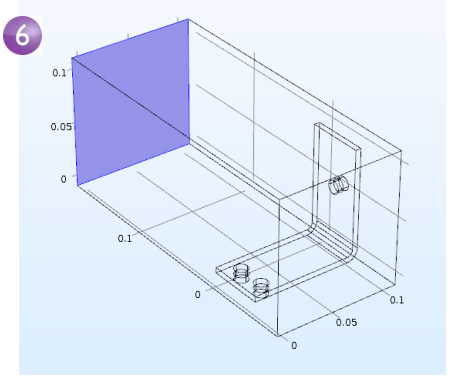


5 定位到**入口**的**设置**窗口，在**速度**栏的 U_0 框中，输入 `Vin` 以设置**法向流入速度**。



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。

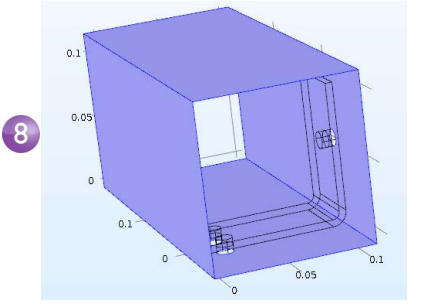
最后一步是添加对称边界。为方便起见，假设空气在通道各个面外的流动情况与这些面内的流动类似，这可以通过对称条件来正确表示。



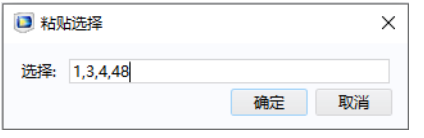
7 右键单击**层流** 并选择**对称**。**对称**节点 会添加到序列中。

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。



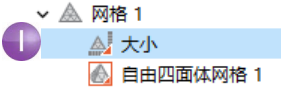
如果已知边界编号，则可以单击**粘贴选择**按钮 并输入该信息。对于本例，在**粘贴选择**窗口中输入 1,3,4,48。单击**确定**，这些边界会自动添加到**选择**列表中。



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。

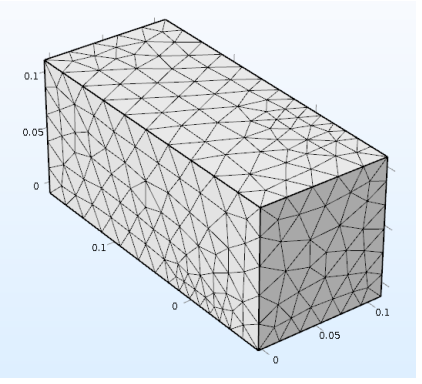
1 在**模型开发器**窗口中展开**网格 1** 节点，并单击**大小**节点。



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**透明度**设置才能看到如下所示的图）。



3

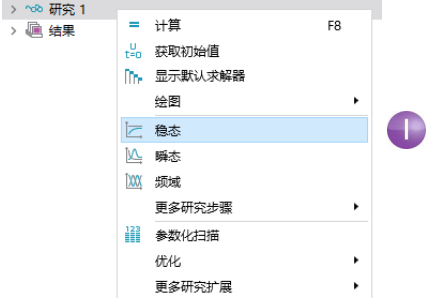
您可以假设流速足够大，从而可以忽略流场中温度升高的影响。

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。



1

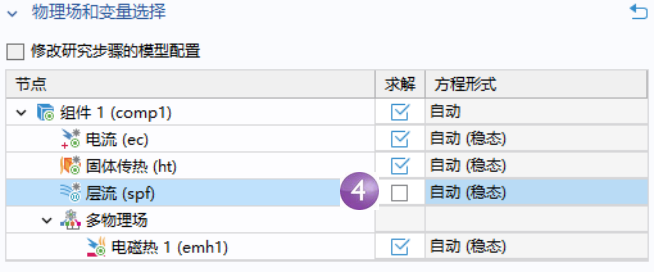
接下来，需要将正确的物理场与正确的研究步骤连接起来。首先禁用与第一步中的焦耳热相关的**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)** 接口。

2 在**研究 1** 节点下，单击**步骤 1：稳态**。

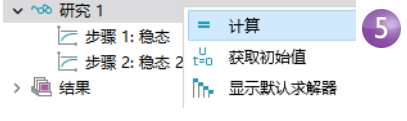


3 在**稳态**的**设置**窗口中，定位到**物理场和变量选择**栏。在**电流 (ec)** 和**固体传热 (ht)** 行对应的**求解**列中，单击以将复选标记 ☑ 更改为 ☐，从而在**步骤 1** 中移除焦耳热效应。

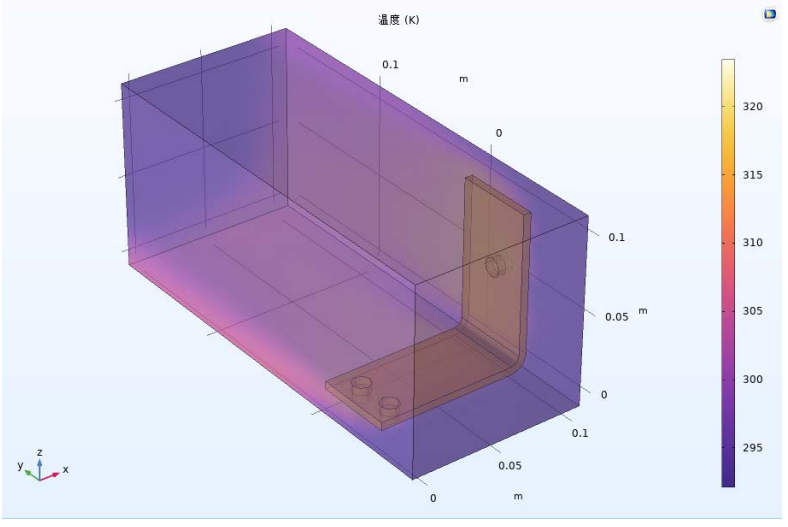
4 重复这一步骤。在**研究 1** 节点下，单击**步骤 2：稳态 2**。在**物理场和变量选择**下的**层流 (spf)** 行中，单击**求解**列，将复选标记 ☑ 改为 ☐。



5 右键单击**研究 1** 节点，然后选择**计算** =（也可以按 F8 或单击功能区中的**计算**）。接下来，软件将自动创建新的求解器序列，并依次求解层流和焦耳热问题。



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**透明度**按钮，将框内的温度场可视化。您可以通过按住鼠标中键 （或滚轮）并拖动鼠标，轻松实现缩放功能。



图形窗口中显示的**温度**图呈现了母线板和周围框的温度分布情况。我们还可以看到，由于网格相对较粗，温度场并不平滑。要得到更平滑的解，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。

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。

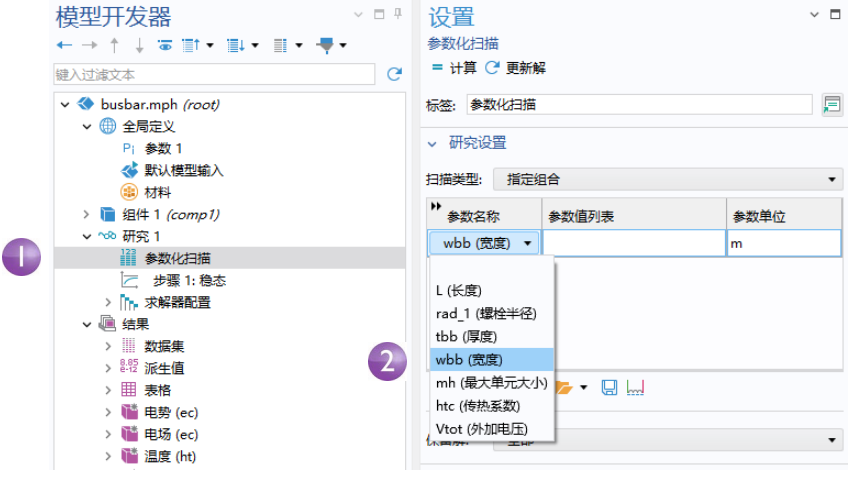
添加参数化扫描

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**。

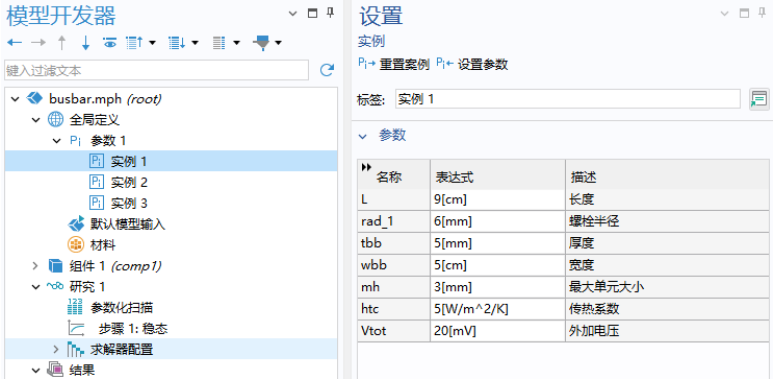


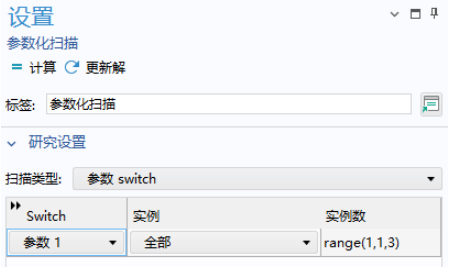
在**模型开发器**窗口中，右键单击**研究 1** 并选择**参数化扫描**。**参数化扫描**节点将添加到**模型开发器**序列中。

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。

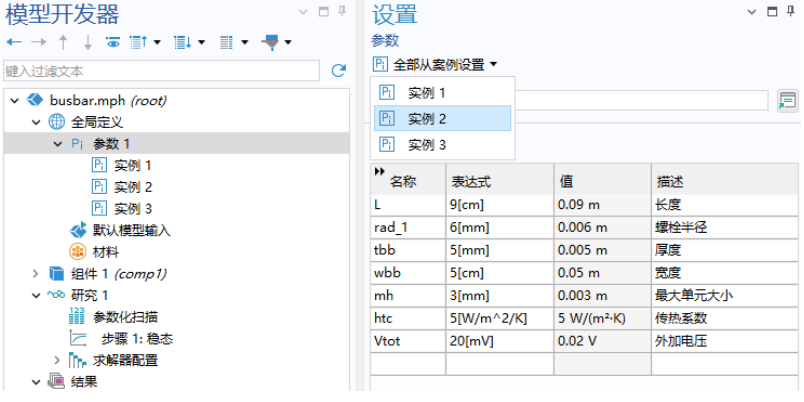


扫描类型用于控制具有多个参数的参数化扫描。您可以选择是扫描给定参数的**所有组合**、**指定组合**的子集，还是扫描**参数 switch**，后者可用于扫描**全局定义**中定义的**参数**的**实例**（如下所示）。



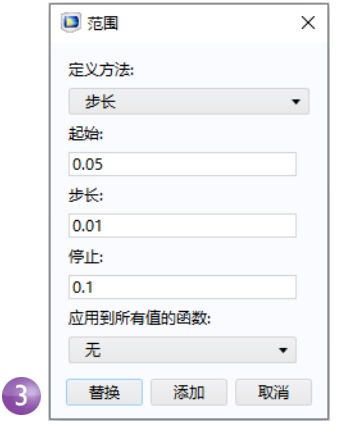


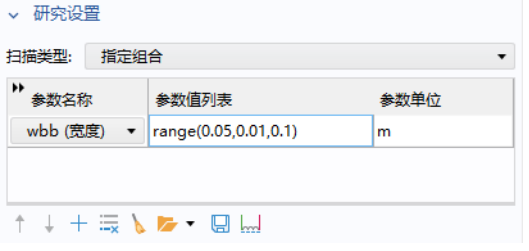
请注意，您可以通过从**参数**窗口左上角的菜单中进行选择，将模型中使用的主要**参数**集替换为**实例**的参数。



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。



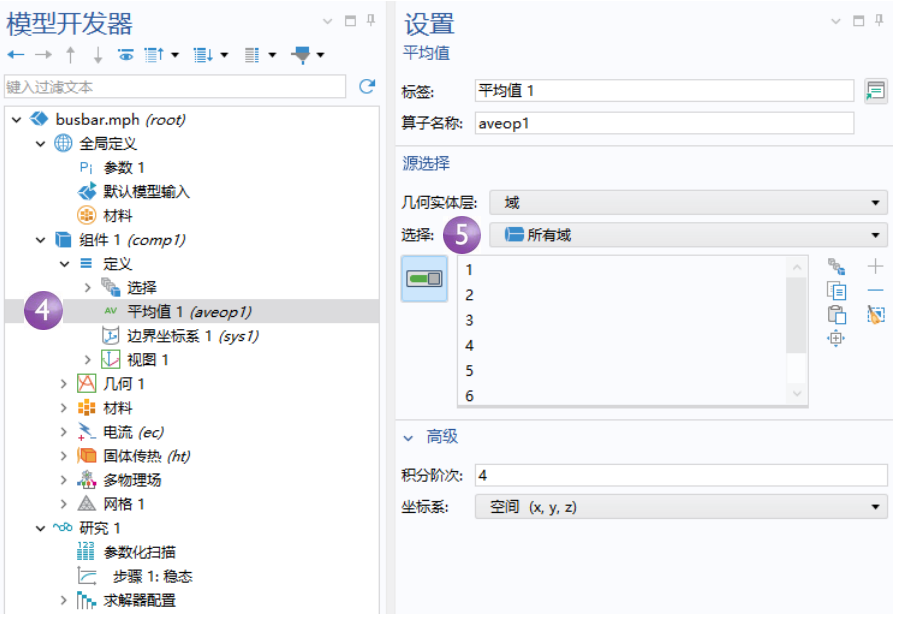


接下来，定义一个**平均值**非局部耦合，稍后可用于计算母线板中的平均温度。

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



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



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

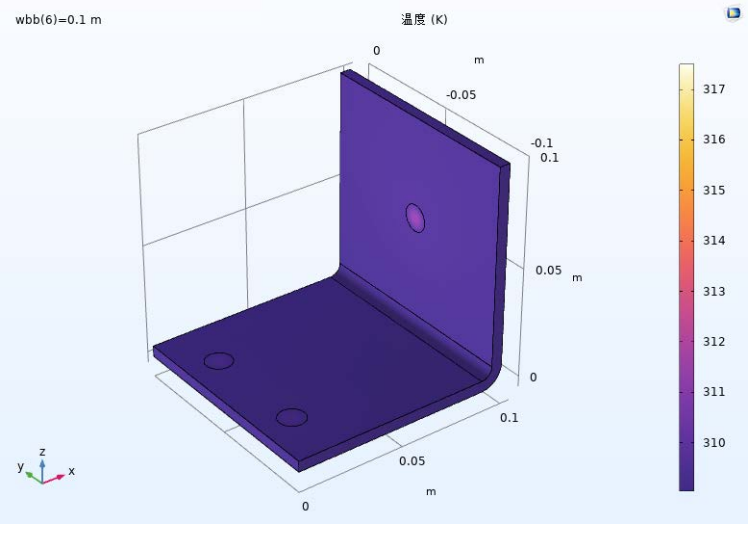
7 要运行扫描，右键单击**研究 1** 并选择**计算** =，或在**主屏幕**选项卡中单击**计算**。

参数化扫描结果

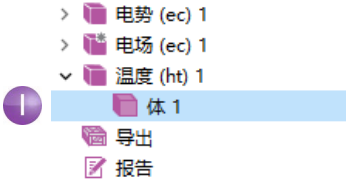
在模型树的**结果**下单击**温度 (ht) 1** 节点（第二个温度图节点）。



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。



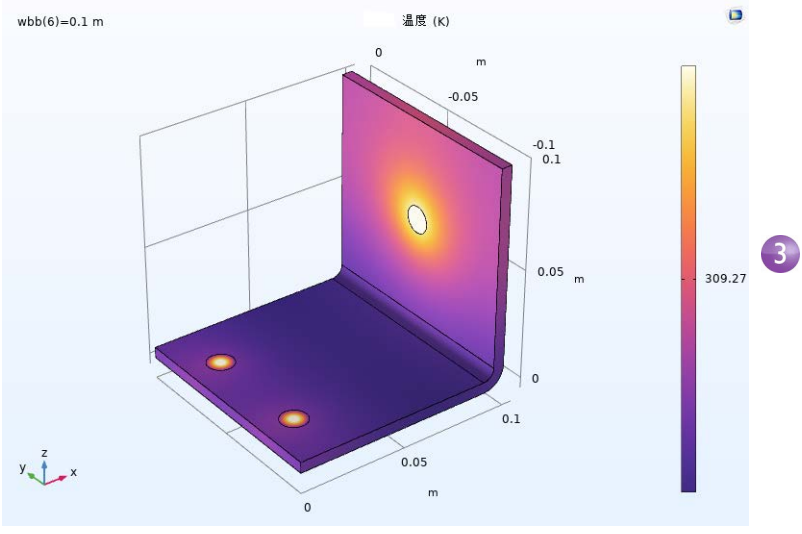
1 在**温度 (ht) 1** 节点下，单击**体**节点 。



2 在**体**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）。

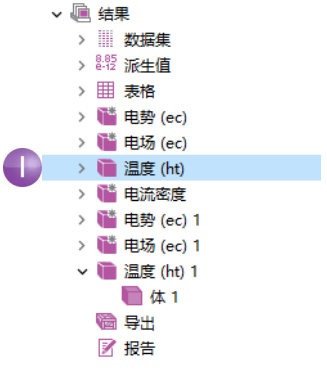


3 **图形**窗口中对应于 wbb=0.1[m] (10[cm]) 的**温度 (ht) 1** 图会更新。



绘图根据您运行的版本可能会略有不同。将这个宽母线板图与 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 。

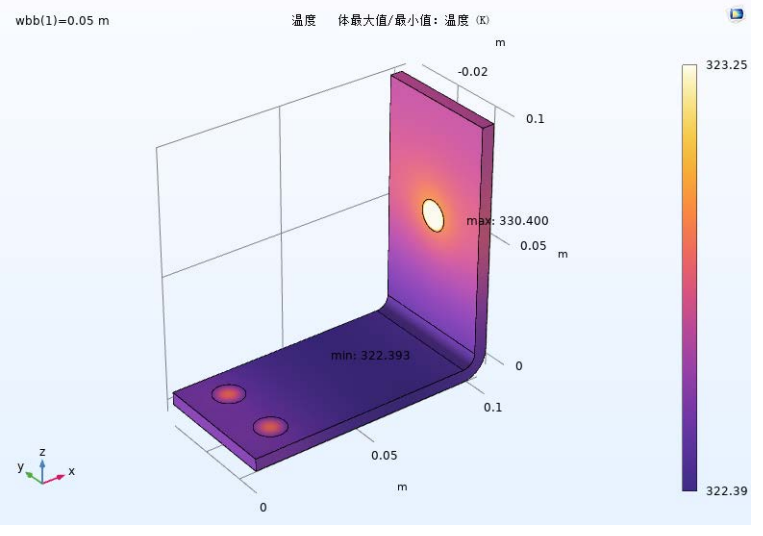


2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，从**数据集**列表中选择**研究 1/ 参数化解 1**。该数据集包含参数化扫描结果。

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**体**节点 。

2 在**体**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）。

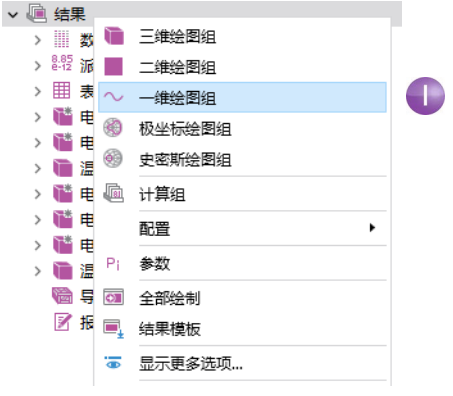
图形窗口中对应于 `wbb=0.05[m] (5[cm])` 的**温度 (ht)** 图会更新。

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。

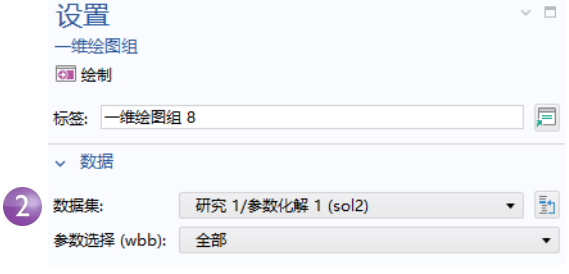
添加更多绘图

您可以绘制每个宽度的平均温度，对这些结果进行深入分析。

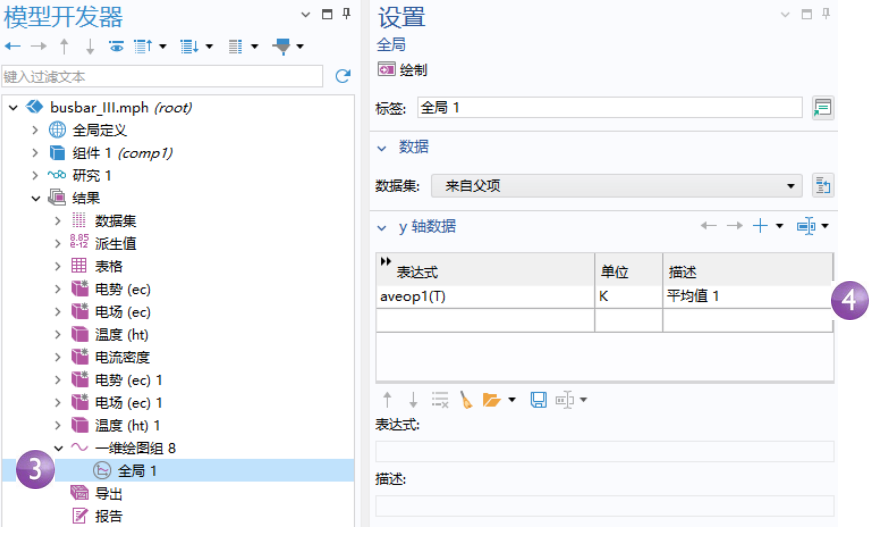
1 右键单击**结果** 并添加**一维绘图组** 。



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** 。

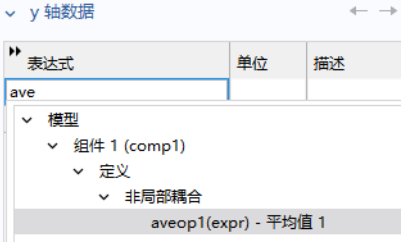


3 在**模型开发器**窗口中，右键单击**一维绘图组**并添加**全局** 节点。

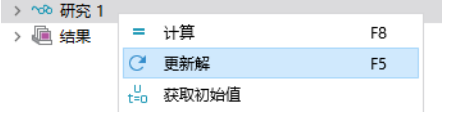


4 在**全局设置**窗口的 **y 轴数据**栏下，单击**表达式**列中的第一行，然后输入 aveop1(T)。该算子是在第 173 页中定义的，可供后续使用。您可以使用类似语法来计算其他量的平均值。

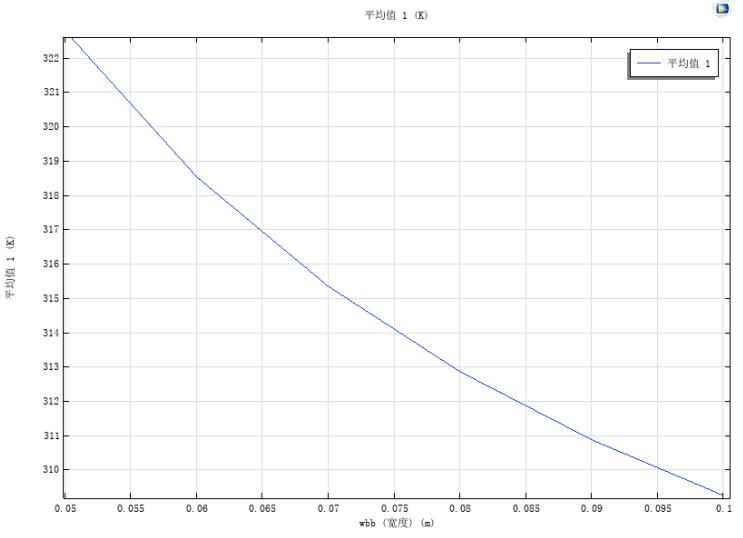
您还可以通过在单击第一行或键入几个字符后，使用 Ctrl+/ 来启用自动补全功能。



为了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。

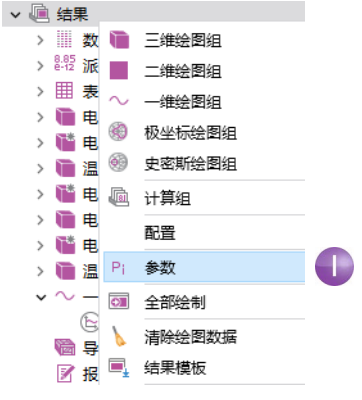


在该绘图中，平均温度随宽度的增加而降低。

结果中的参数

为了获得更高的灵活性，您可以定义仅在**结果**节点中使用的参数，使用这些参数时无需重新求解模型。以下示例展示了如何对**结果**节点下定义的**参数**进行动画演示。

1 右键单击**结果**节点并选择**参数**。



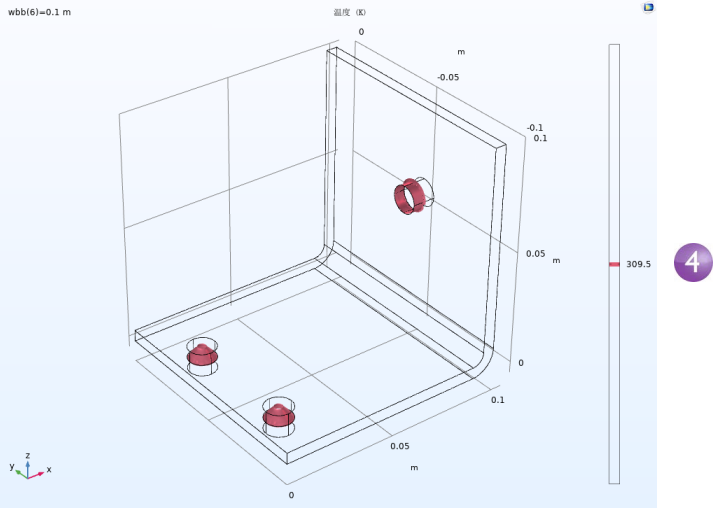
2 定义一个参数 iso_level，其**表达式**为 309.5[K]。



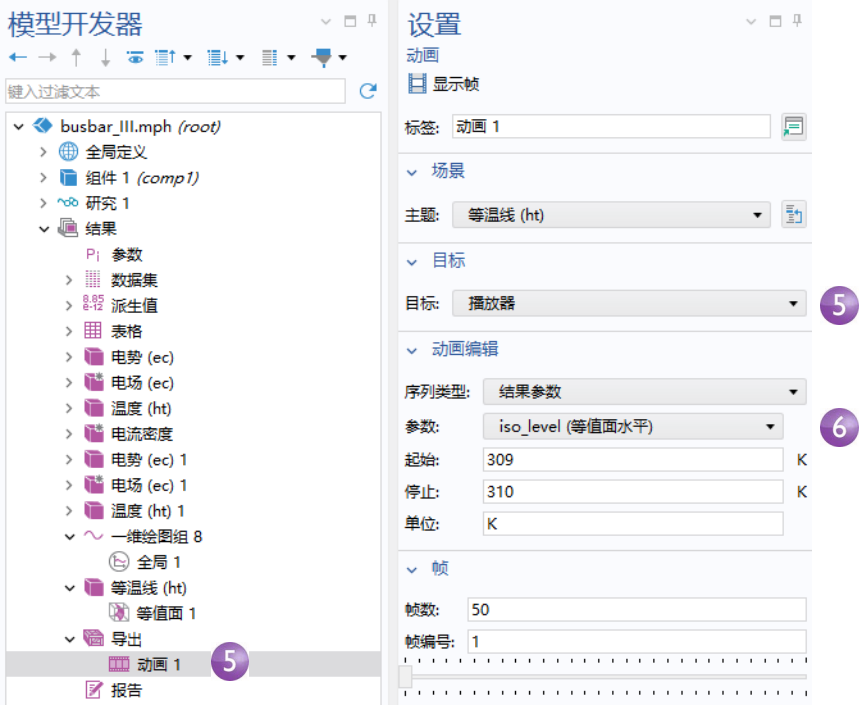
3 右键单击**结果**节点并选择**结果模板**。在**结果模板**窗口中，从**研究 1/ 解 1** 的**固体传热**分支下添加**等温线**图。对于**等温线 (ht)** 绘图组，在**等值面**图的**设置**窗口中，将**定义方法**改为**水平**。在**水平**表达式栏中键入 iso_level。



4 在同一**设置**窗口中，单击**绘制**。



5 通过以下方式之一来生成**动画**：在功能区的**等温线 (ht) 1** 选项卡的**动画**菜单中选择**播放器**选项，或右键单击**导出**节点并选择**动画** > **播放器**。

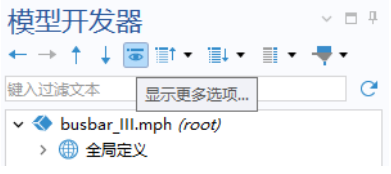


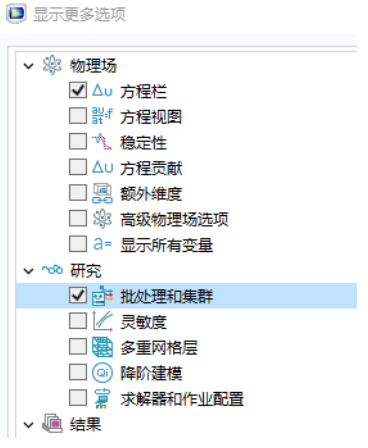
6 在**动画**的**设置**窗口中，将**序列类型**更改为**结果参数**，然后选择 iso_level 参数。在**起始**框中键入 309，并在**停止**框中键入 310。单击**图形**工具栏中的**播放**按钮或**动画设置**窗口中的**显示帧**按钮。为了获取更平滑的动画，您可以增加**帧数**，例如将其改为 50。

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，则可以显著提高计算效率。

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)。

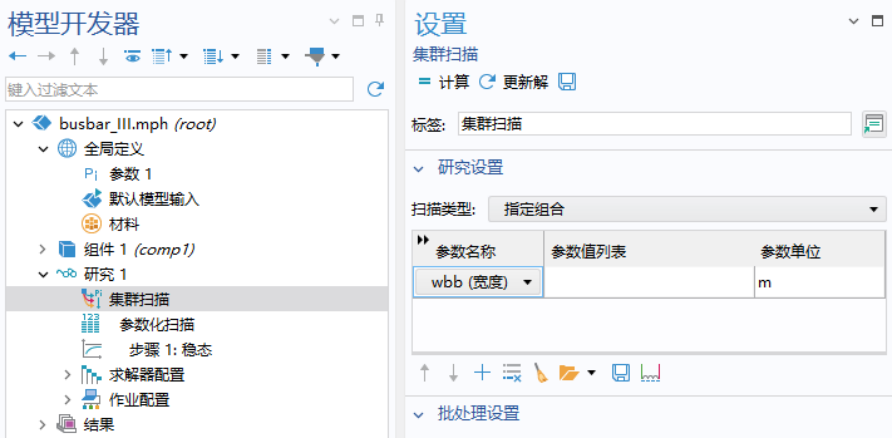
您可以通过以下两个选项之一来使用集群或云计算：**集群扫描**或**集群计算**。如果您有“网络浮动许可证”，则可以通过右键单击**研究**节点来调用这两个选项。不过，首先需要启用**批处理和集群**研究选项，方法是单击**模型开发器**工具栏中的**显示更多选项**按钮 ，并在**显示更多选项**对话框中选中**批处理和集群**。





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，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。



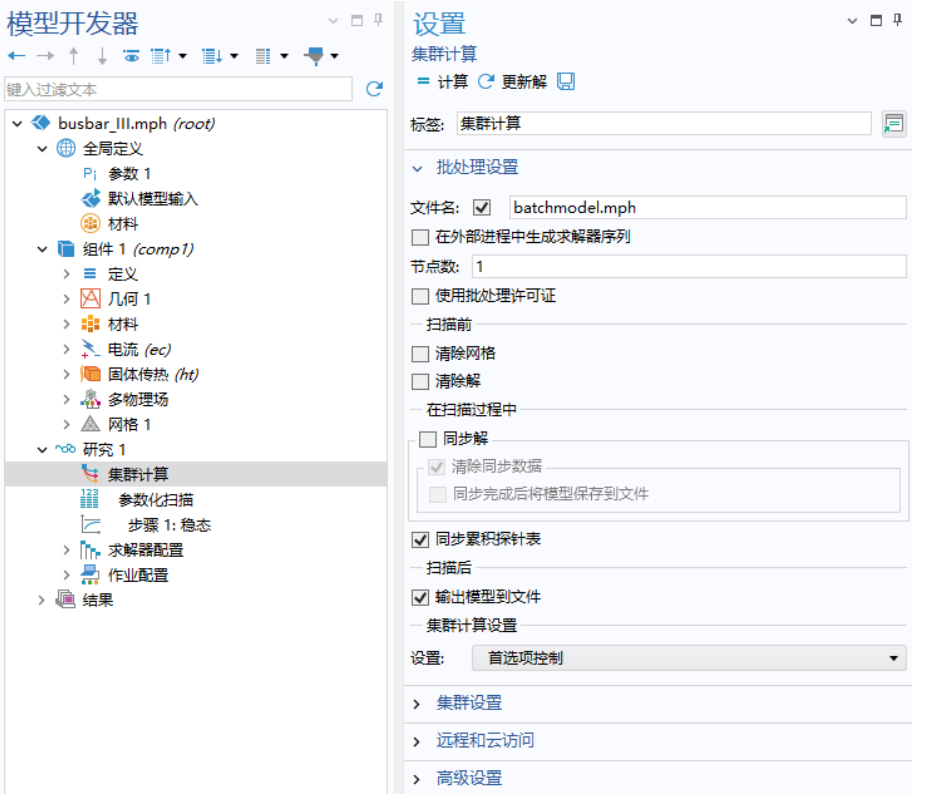
集群扫描的**研究设置**类似于**参数化扫描**，但还需要一些额外设置才能使用集群或云计算。上图显示了与第 170 页的“参数化扫描”中定义的扫描相同时，**集群扫描设置**窗口顶部的显示情况。为了在本例中添加并运行**集群扫描**，首先需要移除**参数化扫描**节点。

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。

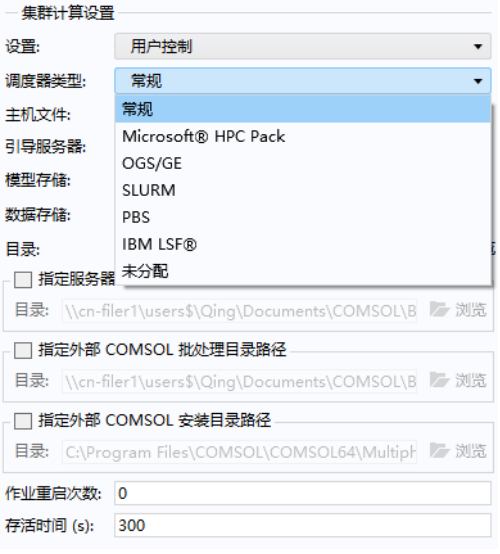
右键单击**研究**节点以添加**集群计算**节点。**集群计算**节点不能与**集群扫描**结合使用，软件将提示您是否在继续操作之前先移除**集群扫描**，选择**是**。

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**窗口中定义。

对于**用户控制**选项，您可以从**调度器类型**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”、Microsoft® HPC Pack、Open Grid Scheduler/Grid Engine (OGS/GE)、SLURM、PBS、IBM LSF® 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**等其他集群和调度器设置通过**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

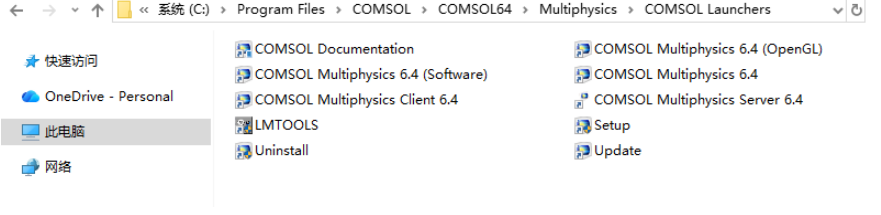
通过 “网络浮动许可证”使用 COMSOL Multiphysics 时，您可以采用客户端 – 服务器运行模式，调用远程计算资源来求解大型模型，同时仍使用本地机器的显卡进行图形显示。请注意，此运行模式不同于通过 Windows® 远程桌面和类似技术连接到 COMSOL Multiphysics 会话；也不同于将 COMSOL Server 产品与 COMSOL App 结合使用的情况。

采用 COMSOL Multiphysics 客户端 – 服务器模式具有显著优势，尤其适用于涉及海量数据的工程与科学计算问题 —— 仿真过程中通常会产生数兆至数千兆字节的数据。为生成和存储这些数据，往往需要使用配备高速处理器、大容量内存 (RAM) 及大容量硬盘的计算机。而对大规模数据集进行可视化呈现，则需为本地计算机配备高性能的显卡。

在理想情况下，建议您全程使用高性能计算机，确保其内存与处理能力足以应对所有仿真步骤。如果当前条件无法满足且需求解更大型的模型，则可通过网络调用共享计算资源。

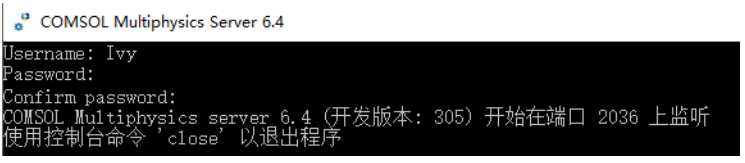
在使用 COMSOL Multiphysics 的过程中，您可以随时通过客户端 – 服务器模式连接远程计算资源。此过程包含两个步骤。首先，登录远程系统并调用 COMSOL Multiphysics 服务器，以启动 COMSOL Multiphysics 服务器进程并打开网络连接。接下来，在本地机器的 COMSOL Multiphysics 运行会话中输入网络连接信息。随后，软件将通过网络透明地双向传输模型数据和结果，并全程使用远程计算资源执行所有计算任务。

启动 COMSOL Multiphysics 服务器会话的方式有多种。在 Windows® 11 系统中，可通过 “开始”菜单的 **COMSOL Launchers** 选项启动服务器会话。

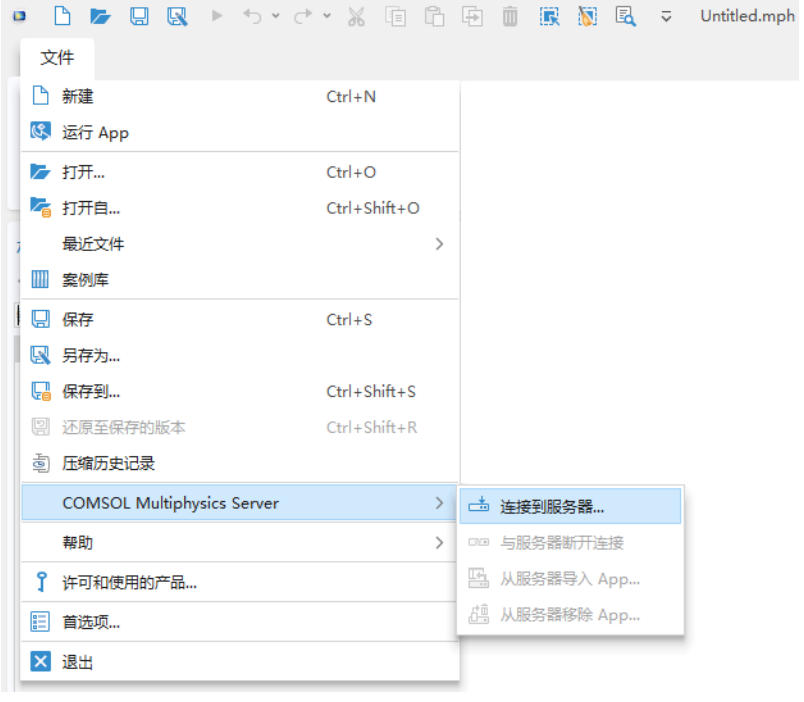


在 Linux® 系统中，可以使用 `comsol mphserver` 命令启动服务器。服务器和客户端会话可以在不同的操作系统上运行。例如，服务器可以在 Linux® 中运行，而客户端会话则可以在 Windows® 中运行。

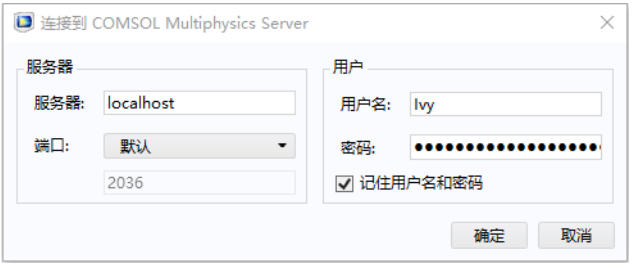
首次在计算机上启动 COMSOL Multiphysics 服务器时，系统会提示您设置用户名和密码，这些凭据将与客户端 – 服务器运行模式关联，并存储供后续连接使用。下图显示在 Windows® 中启动服务器会话的命令窗口。



下图显示如何通过 COMSOL Desktop 用户界面连接到服务器会话。只需从**文件**菜单中选择 **COMSOL Multiphysics Server** > **连接到服务器**，即可完成连接。



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。

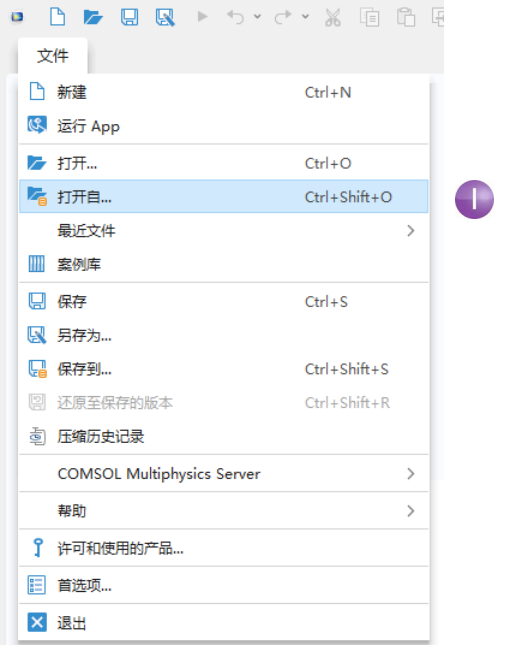
有关使用“模型管理器”的详细信息，请参阅 *Model Manager Reference Manual* 一书。

创建本地数据库

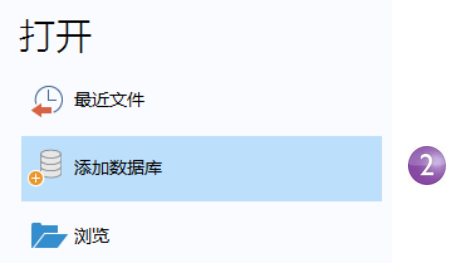
假设您尚未创建本地数据库，可以根据本节的操作步骤进行创建，以便开始使用“模型管理器”。

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**。



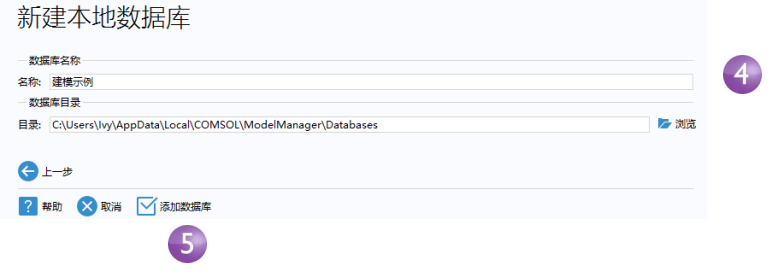
2 在**打开**窗口的选项列表中，选择 **添加数据库**。



3 在**添加数据库**窗口中，选择**新建本地数据库** 。

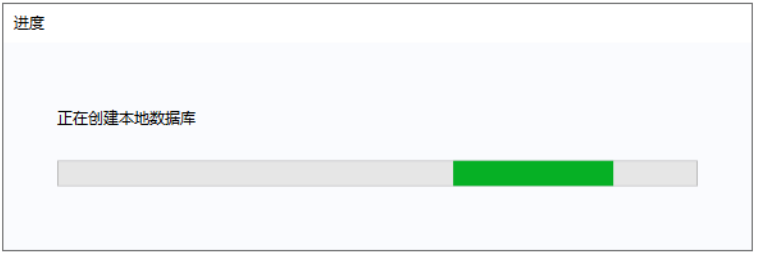


4 在**新建本地数据库**窗口中，在**名称**框中键入**建模示例**作为新数据库的名称。如果您打算继续使用该数据库，可以选择一个更合适的名称。

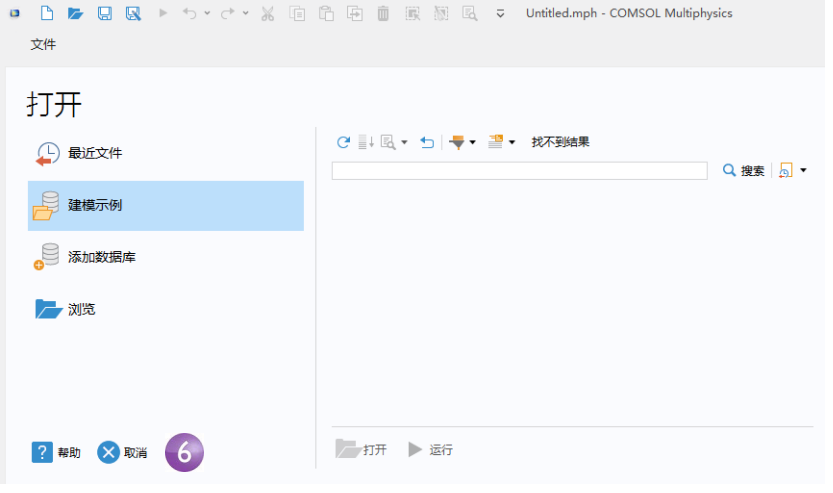


5 单击 **添加数据库**。

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**。

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**窗口中选择**结构力学 > 固体力学 (solid)** 。单击**添加**。单击**研究** 继续操作。

4 选择**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**保存新数据**。

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\COMSOL64\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。

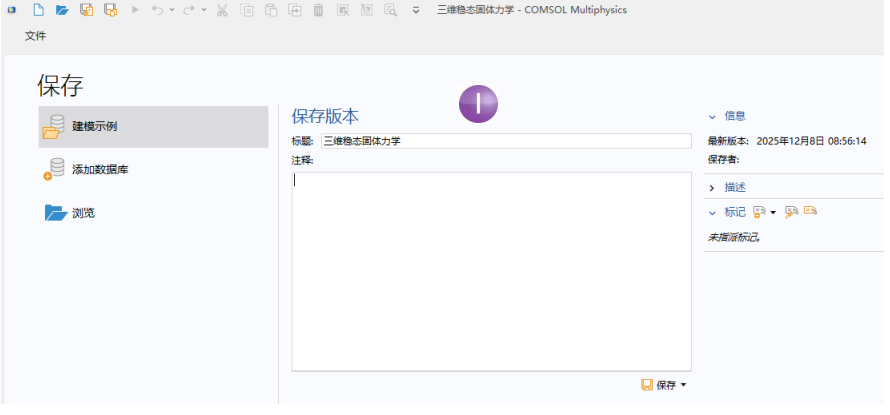
5 选择**几何 1** 并在**设置**窗口中单击**全部构建**按钮 。

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**。

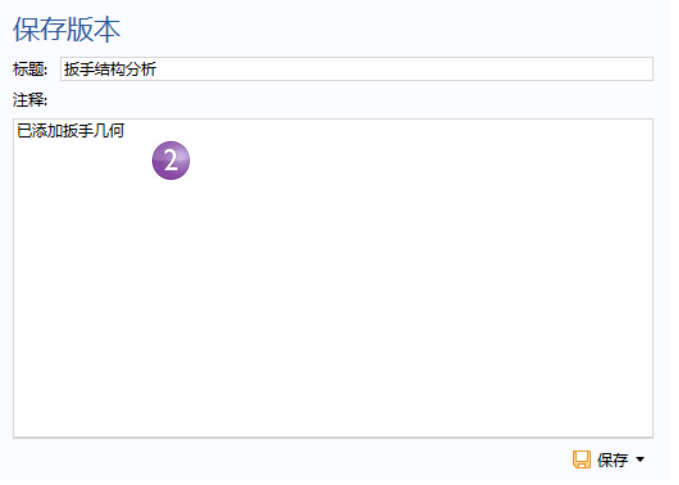


此时会打开**保存**窗口，并在选项列表中预先选中您的数据库。



由于该模型已经存在于数据库中，因此标题为**保存版本**，这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。

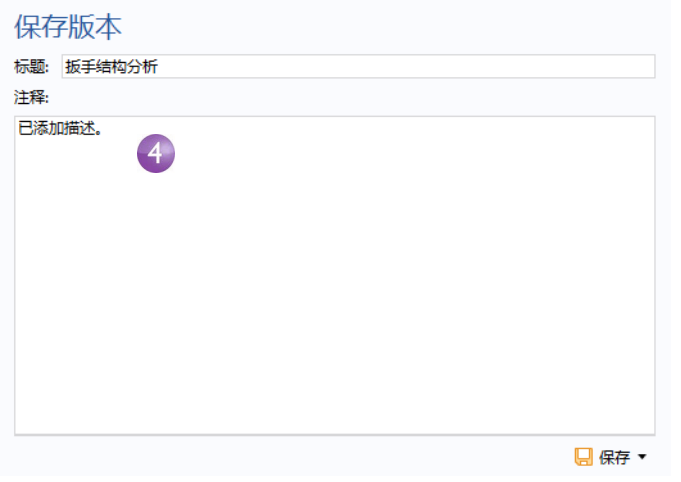
为了演示多个版本，我们将对模型做一个小改动，并通过为模型添加描述来保存另一个版本，即第三个版本。

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**。

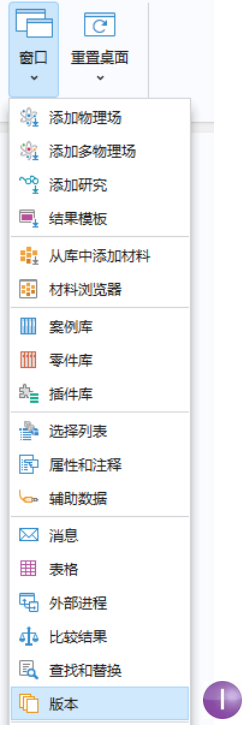
4 在**注释**框中键入 “**已添加描述。**”。单击 **保存**。



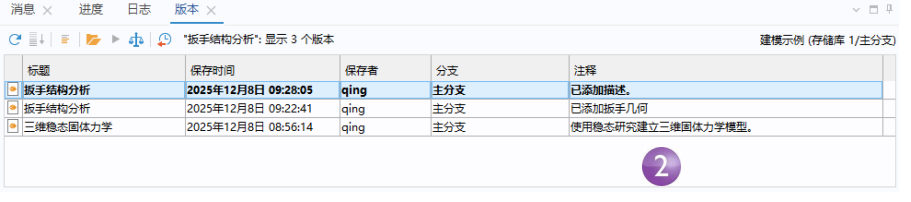
版本窗口

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。



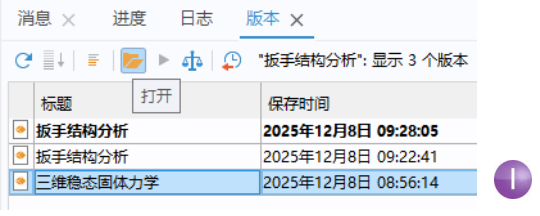
2 您将在表格中看到按时间顺序排列的三个版本，第一行是最新版本，最后一行是最旧的版本。表格中的第一行用粗体突出显示，表示它是 COMSOL Desktop 中的当前版本。



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 中打开的是最新的第三个版本。

您可能已经注意到，保存新的模型版本需要多个步骤，而保存从文件系统打开的模型时只需按 Ctrl+S 即可。您需要打开**保存**窗口，考虑添加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，您可能会意识到您的建模工作在朝着错误的方向发展，从而导致版本历史记录变得混乱，充斥着一些不需要的版本。

在处理模型时，一种更轻便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。

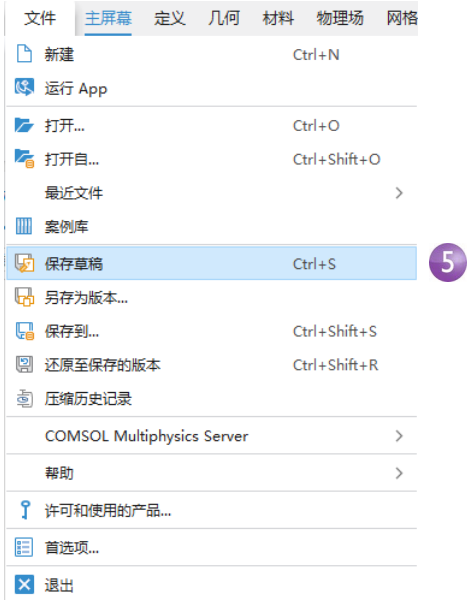
开始创建新草稿

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。

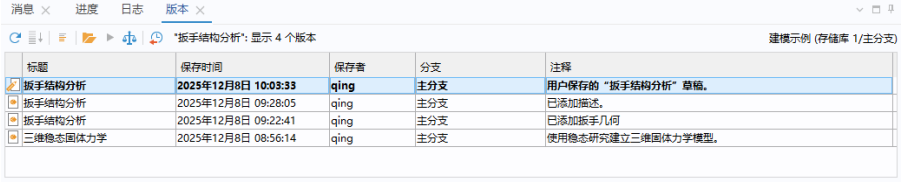
我们为扳手添加通用的钢材料，并将模型另存为新的草稿。

1. 单击**组件 1** > **材料** ，在**几何清理**对话框中，单击**自动清理**。如果您之前选中了**记住我的选择**复选框，则该对话框将不再显示。
2. 右键单击**组件 1** > **材料** ，然后选择**从库中添加材料** 。
3. 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”**。
4. 关闭**添加材料**窗口。

5 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。在**版本**窗口中可以看到，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。



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。

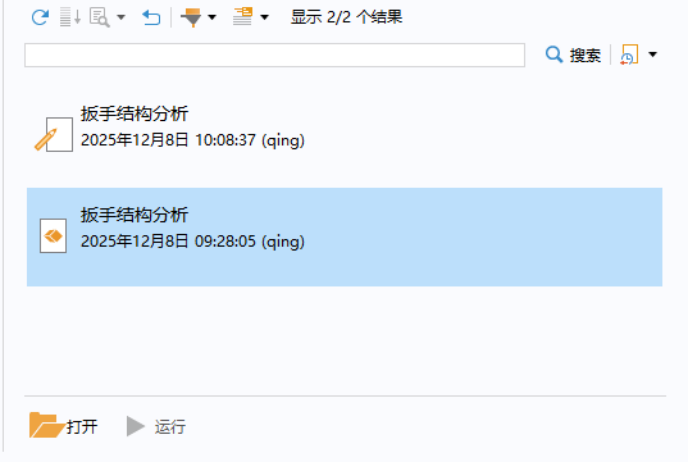
与原始模型的正式版本类似，您可以通过在表格中选择相应的行并单击**打开**，来查看较旧的草稿版本。

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** ( )。

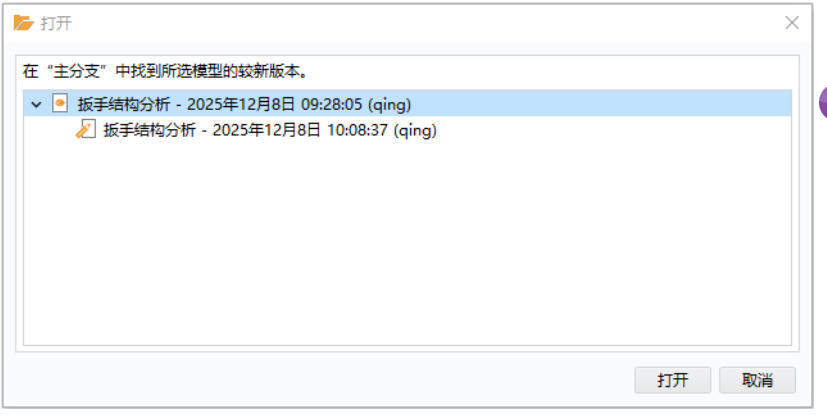
2 在**打开**窗口中，从选项列表中选择**建模示例**数据库。

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，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，这将放弃草稿工作。稍后，您可以手动从数据库中删除草稿本身。

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** 。

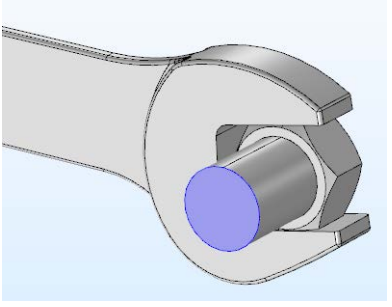
2 在**打开**窗口中，从选项列表中选择您的数据库。

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：

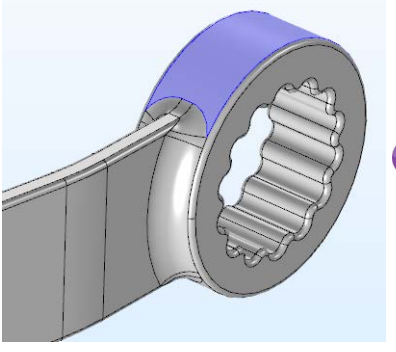
1 右键单击**固体力学 (solid)** 并选择**固定约束** 。

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**更粗**。

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。



完成草稿

完成组件设置后，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**。

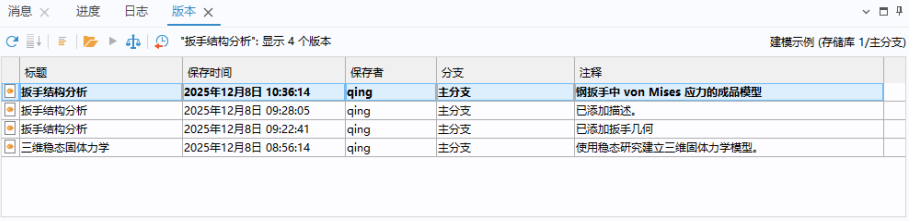
此时会打开**保存**窗口，并在列表中预先选中您的数据库。标题为**从草稿保存版本**，作为将从草稿保存的原始模型的新版本。

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。



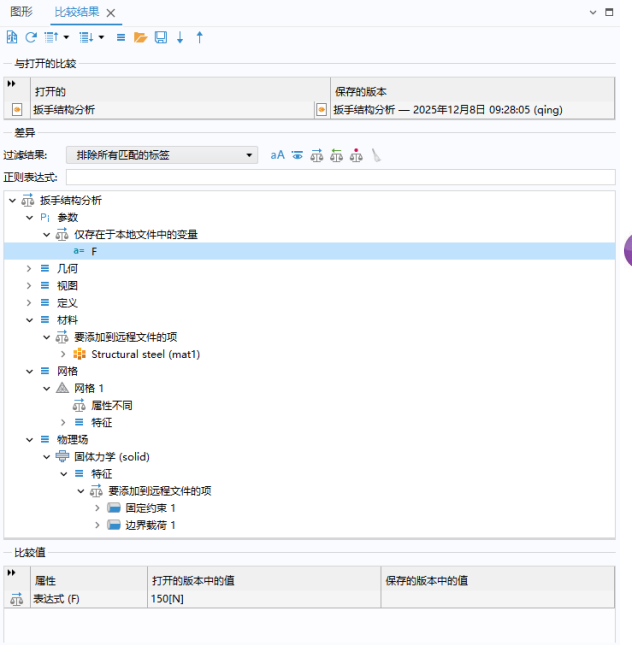
标题	保存时间	保存者	分支	注释
扳手结构分析	**2025年12月8日 10:36:14**	**qing**	**主分支**	**钢扳手中 von Mises 应力的成品模型**
扳手结构分析	2025年12月8日 09:28:05	qing	主分支	已添加描述。
扳手结构分析	2025年12月8日 09:22:41	qing	主分支	已添加扳手几何
三维稳态固体力学	2025年12月8日 08:56:14	qing	主分支	使用稳态研究建立三维固体力学模型。

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。

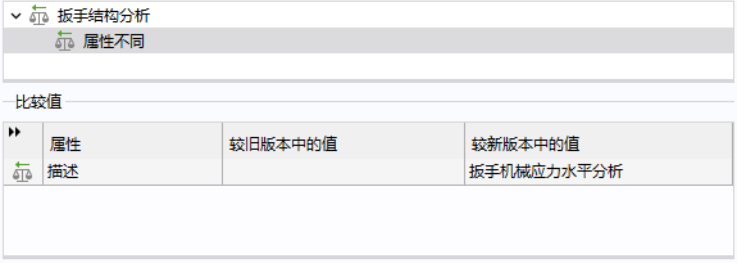


此外，您也可以将两个旧版本相互进行比较：

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：

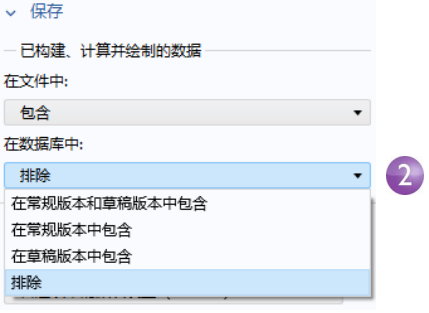
1 在**版本**窗口中，双击第一行。

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。

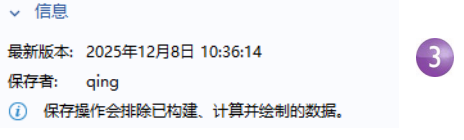
2 在**设置**窗口的**保存**栏中，从**已构建、计算并绘制的数据**下的**在数据库中**列表中选择**排除**。



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**。

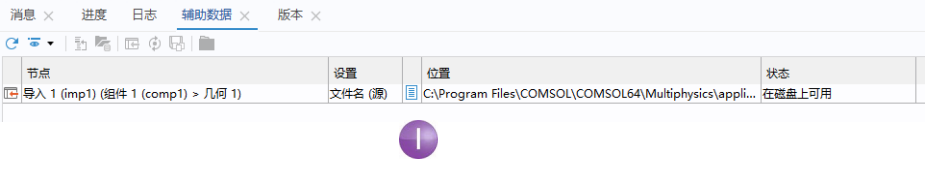
保存后，模型在 COMSOL Desktop 中保持其已求解的状态。转到**文件**菜单，选择 **还原至保存的版本**，然后在出现的对话框中单击**是**。此时会打开不包含解的最新保存版本。您可以通过右键单击**研究 1** 并选择**计算** 来重现（到目前为止）丢失的解。

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：

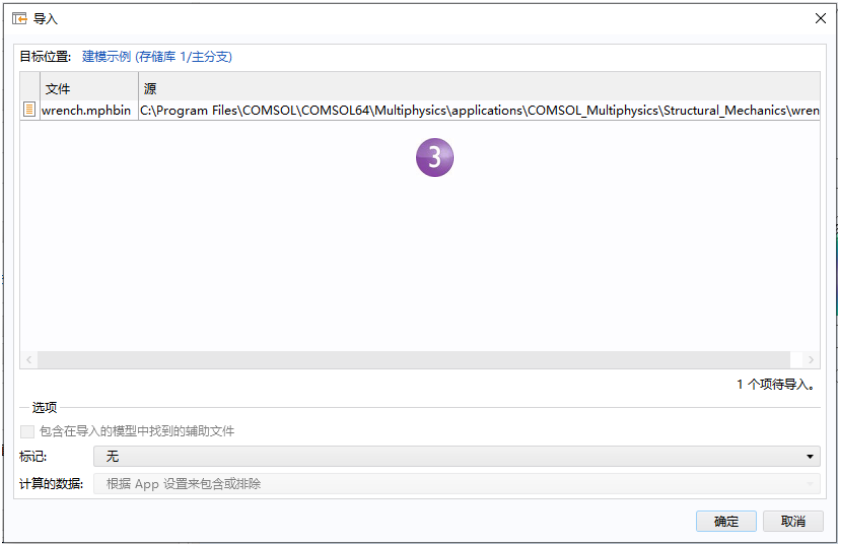
1 从**主屏幕**工具栏的**布局**部分的**窗口**菜单 中，选择**辅助数据**以打开**辅助数据**窗口。

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。



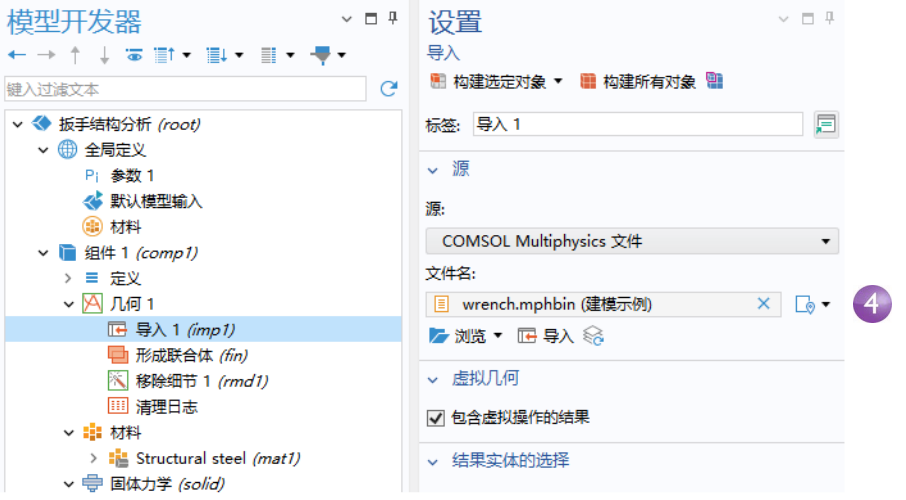
2 选择表格行，然后右键单击任意一行，并选择**导入至数据库** 。

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



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。

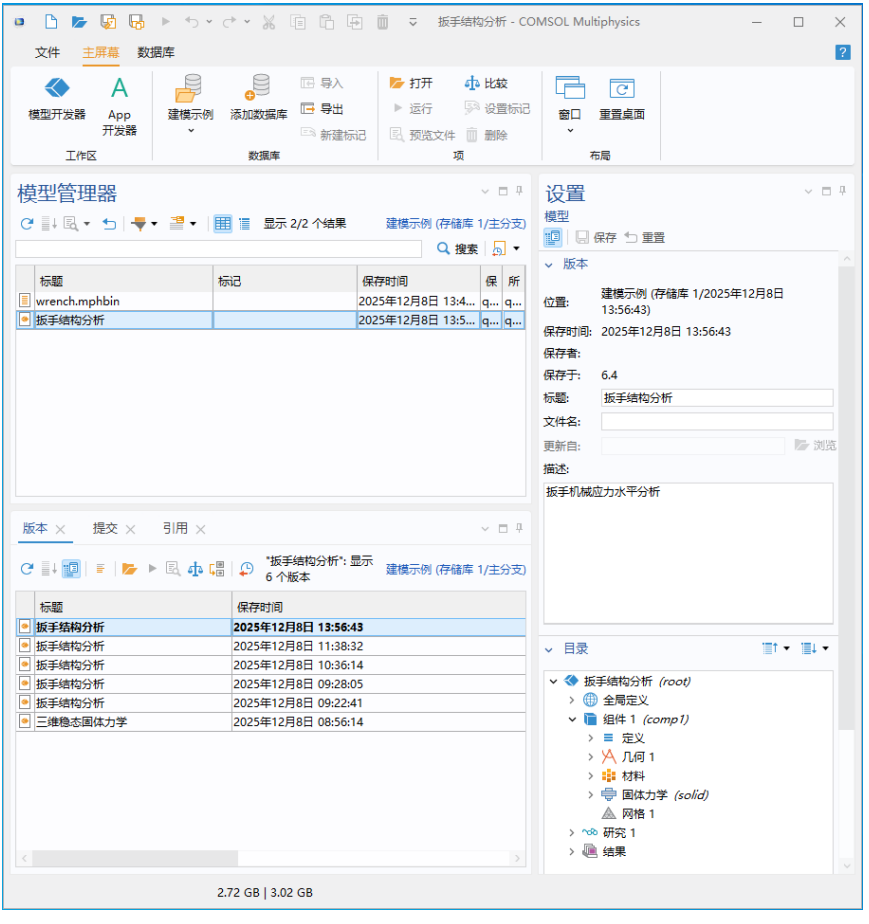
1 从**文件**菜单中选择 **另存为版本**。

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

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。

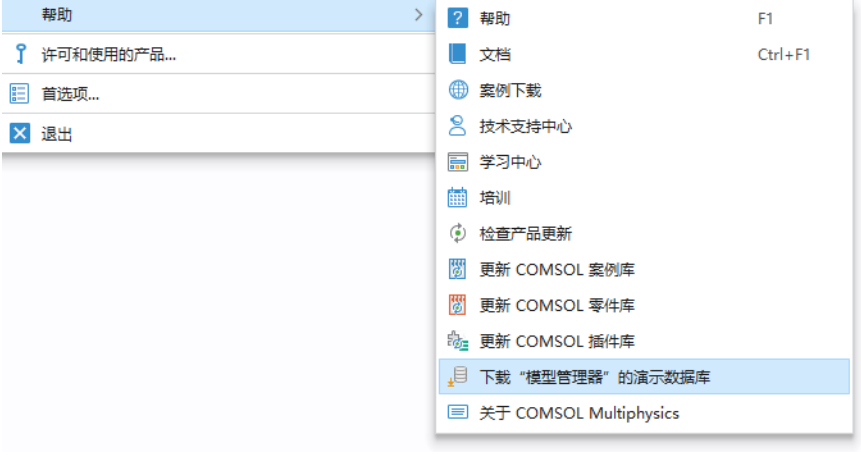
您可以单击**主屏幕**工具栏的**工作区**部分中的**模型管理器** 按钮，打开 “模型管理器” 工作区。在 “模型管理器” 工作区中，您会看到 “模型管理器” 工具栏以及属于该工作区的各种窗口，其中显示模型和 CAD 文件的最新版本。



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。

为了更方便地测试“模型管理器”的各种特征，您可以通过以下操作下载一个演示数据库：从**文件**菜单中选择**帮助** > **下载“模型管理器”的演示数据库**。



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形状。

模型树中“几何”节点下的所有几何操作都按其参数序列（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 264 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 79 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。

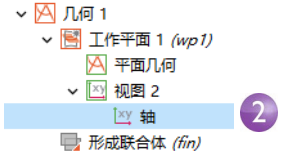
几何序列的第一步是绘制母线板的剖面图。

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**的**设置**窗口中，单击工具栏中的**转到平面几何**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。

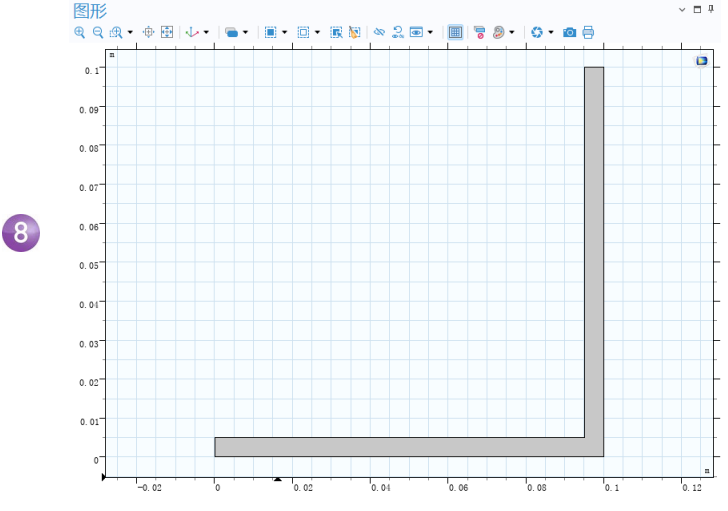
8 单击**差集**节点。在**差集**的**设置**窗口中，单击**要减去的对象**列表左侧的**活动选择**按钮。选择较小的矩形 r2，方法是使用鼠标滚轮或箭头键来循环切换重叠的矩形，先将其突出显示，然后单击将其选中。



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，并选择**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。

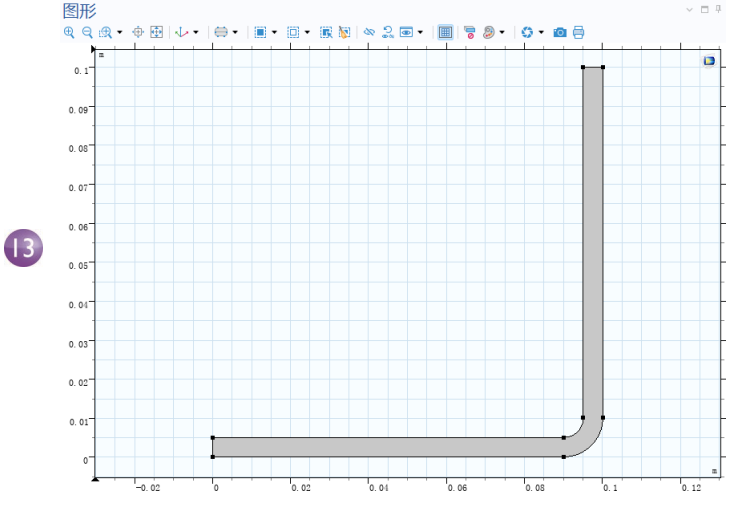
11 对于外拐角，右键单击**平面几何** 并选择**倒圆角** 。

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** 。



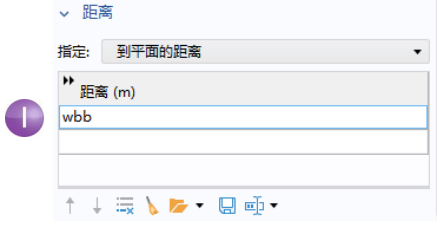
结果应与下图相符：



“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。

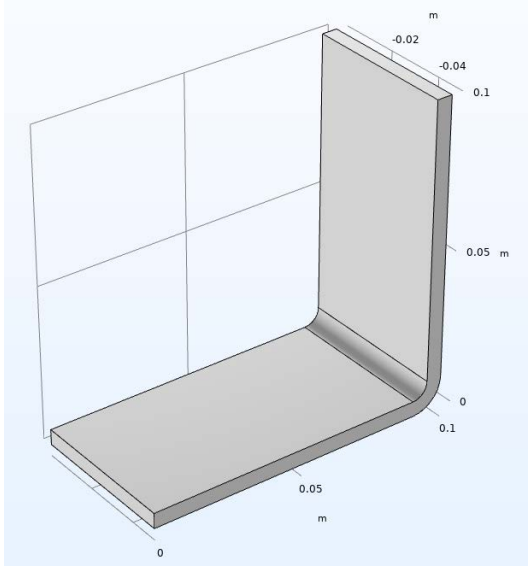
接下来，拉伸工作平面以创建三维母线板几何。

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。



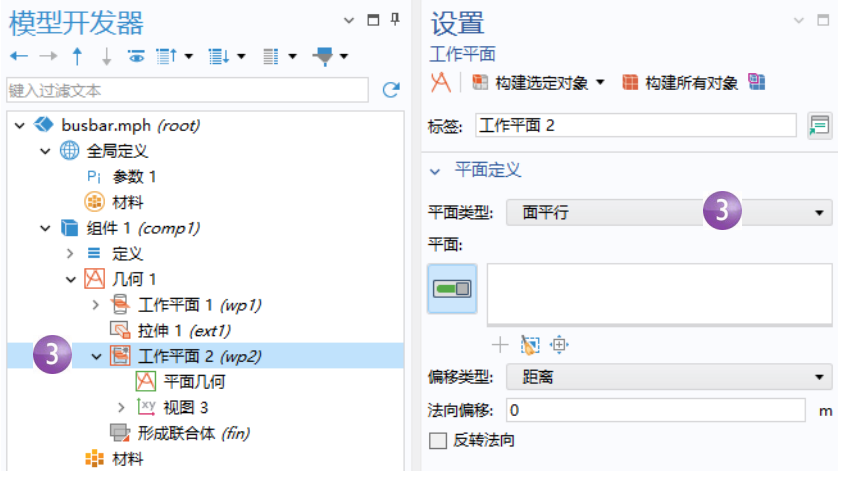
该表格支持输入多个值，以创建采用不同材料的夹层结构。在本例中，只需要拉伸一个层。

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）。



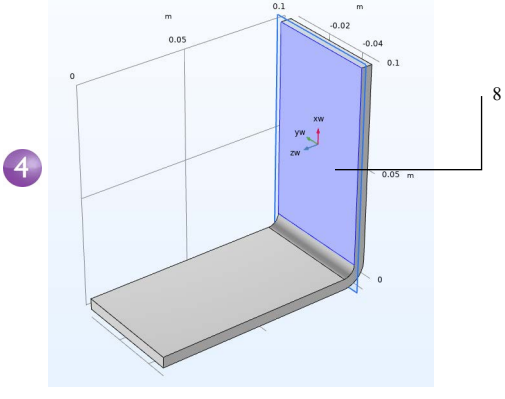
接着，通过拉伸在两个工作平面上绘制的两个圆来创建钛螺栓。

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**转到平面几何**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：

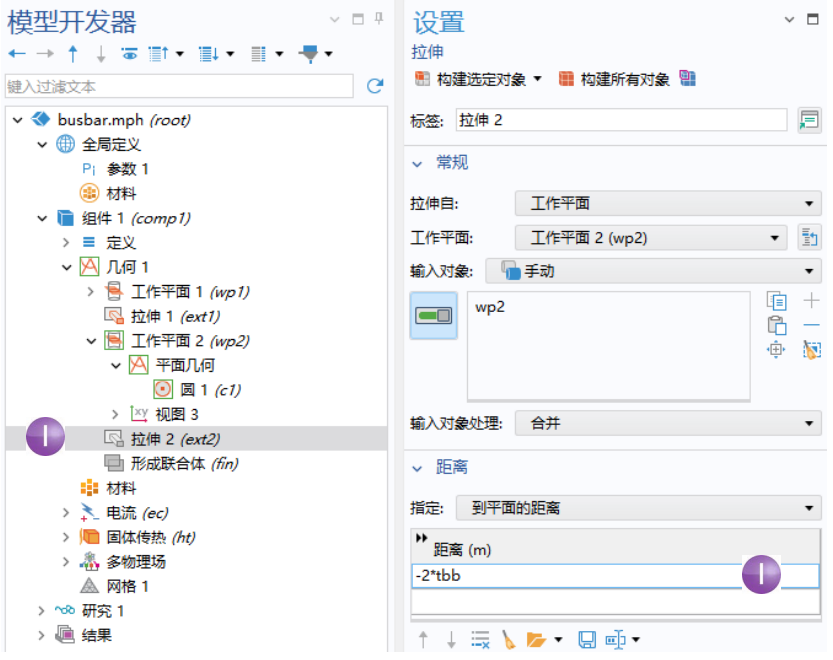
- 在**大小和形状**栏的**半径**框中，输入 rad_1。
- 在**位置**栏中，保留默认的 **xw** 和 **yw** 坐标 (0, 0)。

单击**构建选定对象** 。

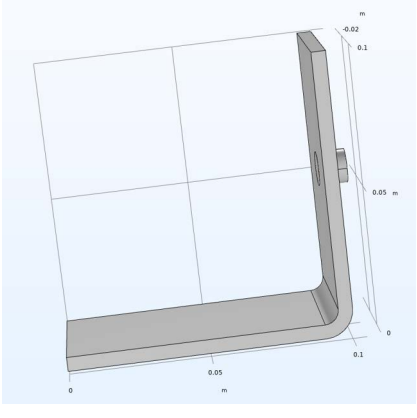


接下来，我们通过添加拉伸操作继续创建螺栓。

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。

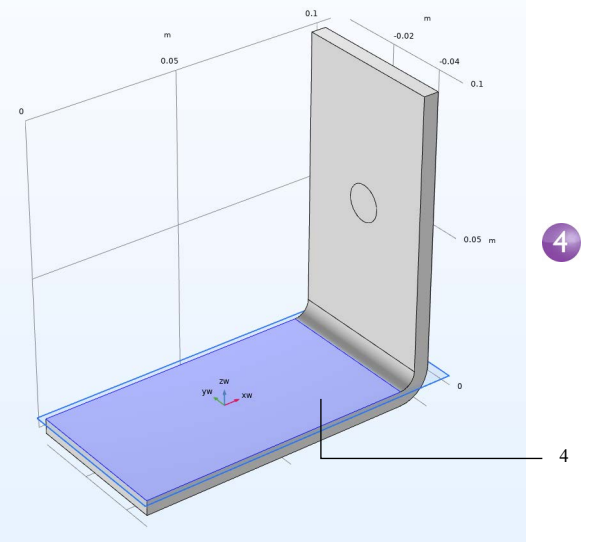


2

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** 。

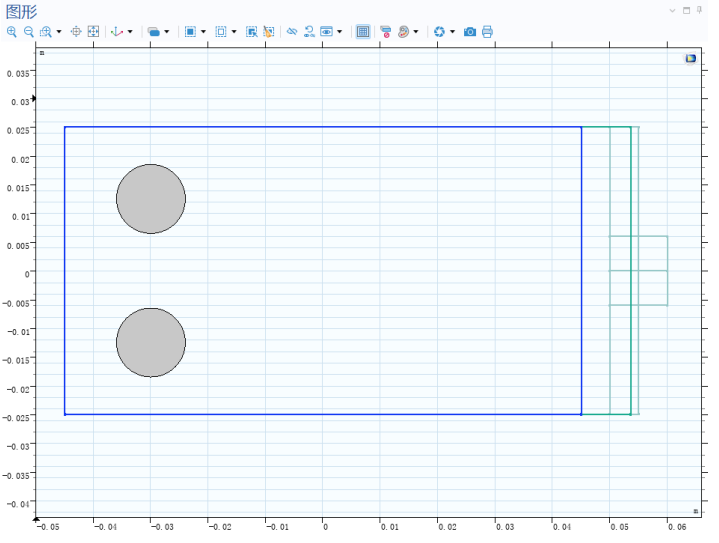
8 在**图形**窗口中，单击圆 c1 将其选中并添加到**复制设置**窗口的**输入对象**列表中。

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。

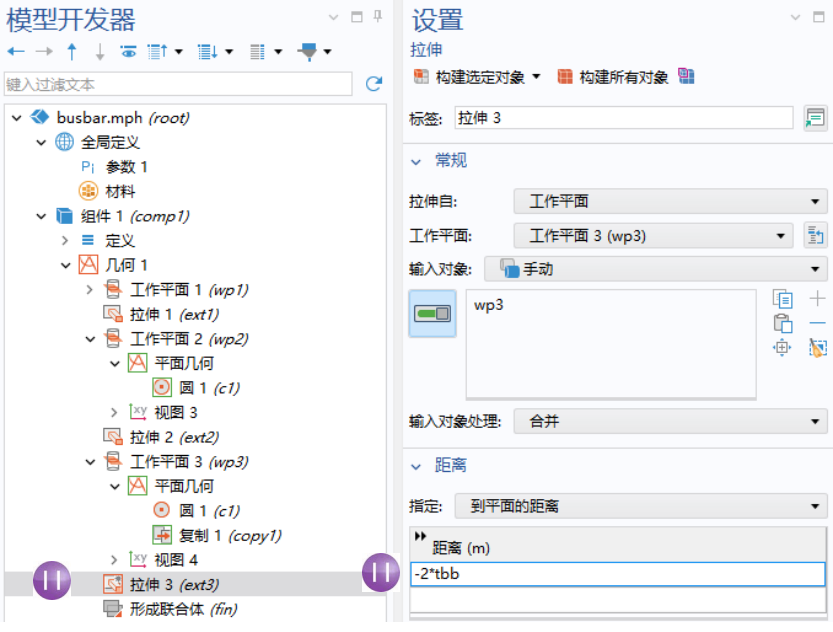
现在，工作平面中显示的几何应与下图相符。



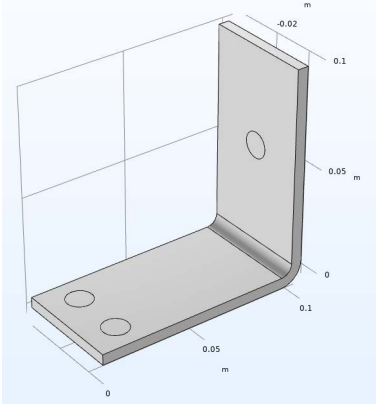
10

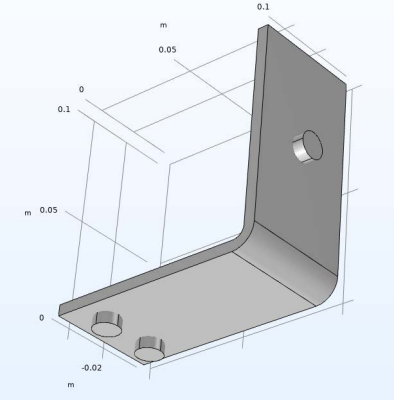
接下来，继续对圆执行拉伸操作。

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`。





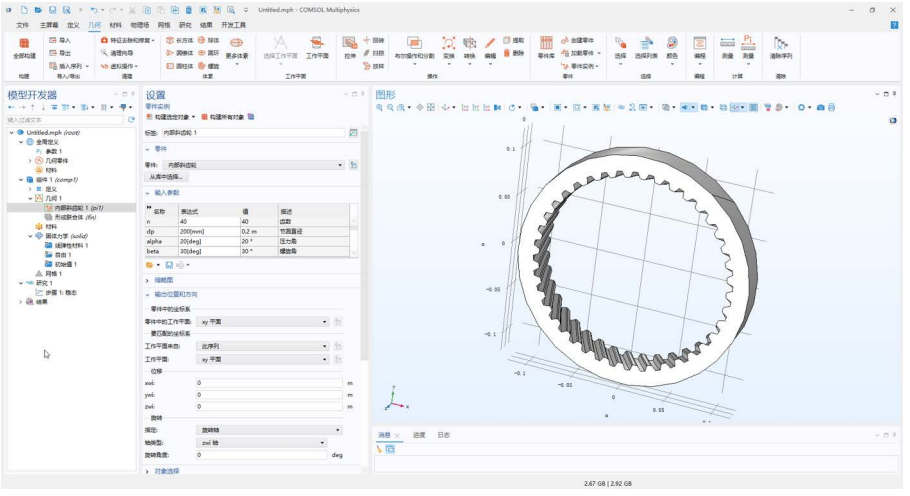
建立母线板或其他几何模型后，您可以方便地将其保存以供后续使用，从而避免重复操作。在刚完成的操作步骤中，几何直接存储在 COMSOL 模型文件中，该文件也将用于构建完整的母线板模型。此外，您还可以创建可重用的参数化零件，作为更复杂 COMSOL 模型几何的构建块。这类零件存储在单独的文件中，并可通过 “零件库”随时调用。

在构建母线板几何过程中，您已使用了**几何**和**工作平面**选项卡中的特征。这些选项卡也提供了**零件**功能区栏。



您可以从**零件**功能区栏选择创建或加载零件，也可以通过从**零件库**中选择一个零件以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”。创建的新零件会添加到模型树的**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 93 页的 “材料”一节。

附录 B—— 键盘和鼠标快捷键

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

键盘快捷键

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (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，可以在“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，可以在“App 开发器”的 “方法编辑器”调试工具中继续操作。

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (MACOS)	操作
F7	F7	在几何与网格分支中构建选定的节点，计算选定的研究步骤，计算求解器序列中的选定节点，或为瞬态、特征频率或特征值解绘制下一个绘图。 此外，在 Windows 上，可以使用“App 开发器”的“方法编辑器”调试工具进行步进调试。
F8	F8	构建几何、构建网格、计算整个求解器序列、更新结果数据、更新绘图、编写报告或演示文稿，或者运行方法或方法调用。 此外，在 Windows 上，可以在“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。

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (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。复制树节点。
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+Shift-F	Command+Shift+F	在方法中查找搜索字符串。
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。

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (MACOS)	操作
Ctrl+N	Command+N	新建模型。
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+Shift+R	Command+Shift+R	还原至已保存的模型文件版本，并重新初始化用户界面。
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++		Ctrl 键和 + 键：在 “App 开发器” 的表单编辑器、方法编辑器和 “主窗口” 编辑窗口中放大视图。
Ctrl+–		Ctrl 键和 – 键：在 “App 开发器” 的表单编辑器、方法编辑器和 “主窗口” 编辑窗口中缩小视图。
Ctrl+0		在 “App 开发器” 的 “表单编辑器”、“方法编辑器” 和 “主窗口” 编辑窗口中，将缩放比例重置为 100%。
Ctrl+Alt+0		缩放以适应 “App 开发器” 中 “表单编辑器” 和 “主窗口” 编辑窗口的可用空间。
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。

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (MACOS)	操作
Ctrl+ 上箭头	Command+ 上箭头	将 “定义”节点、“几何”节点、物理场节点 （默认节点除外）、“材料”节点、“网格”节点、“研究步骤”节点或“结果”节点上移一步。
Ctrl+ 下箭头	Command+ 下箭头	将 “定义”节点、“几何”节点、物理场节点 （默认节点除外）、“材料”节点、“网格”节点、“研究步骤”节点或“结果”节点下移一步。
Ctrl+/	Ctrl+/	在表达式的文本字段中：访问特殊运算符、变量、前缀、函数和其他表达式的列表。在 “App 开发器”的方法中：用于代码补全。
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。
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。

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (MACOS)	操作
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。
+, -	+, -	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。
Shift+ 除号键	Alt+Shift+ 左箭头	折叠树的其他部分。
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

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (MACOS)	操作
按住鼠标左键并拖动鼠标。	与 Windows 相同	以场景旋转点为原点，绕平行于屏幕 x、 y 轴的轴旋转场景。
按住鼠标右键并拖动鼠标。	与 Windows 相同	在图像平面上朝任意方向移动可见框 （平移）。
按住鼠标中键并拖动鼠标。	与 Windows 相同	以鼠标起始点为中心，放大 / 缩小场景。
按住 Ctrl 键并滚动滚轮。	与 Windows 相同	以鼠标起始点为中心，放大 / 缩小场景。
按住鼠标中键并滚动滚轮。	与 Windows 相同	以鼠标起始点为中心，按较大步幅放大 / 缩小场景。
按住 Ctrl 键并单击左键。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	绕图像平面的 x 和 y 轴旋转，实现相机的倾斜和平移。
按住 Ctrl 键并单击右键。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	在与图像平面平行的平面上移动相机。
按住 Ctrl 键并单击鼠标中键。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	移动相机使其靠近和远离对象（推近或拉远）。
按住 Ctrl 键并单击鼠标中键。	与 Windows 相同	缩放到由鼠标位置确定的模型区域。
按住 Ctrl+Alt 键并单击左键。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	绕相机视线方向旋转场景中的对象。
按住 Alt 键并单击左键。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	绕经过相机原点和场景旋转中心（滚动方向）的轴旋转场景中的对象。

快捷键 (WINDOWS, LINUX)	快捷键 (MACOS)	操作
按住 Alt 键并单击右键。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	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。
按住 Alt 键并单击鼠标中键。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	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。按住键盘键和鼠标按键的同时拖动鼠标。	与 Windows 相同	分别绕 X、 Y 或 Z 轴旋转。
R	R	在手动与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，循环切换可选的三维几何实体（域、边界、边、点）。

附录 C—— 语言元素和保留名称

在 COMSOL Multiphysics 中构建模型树，等同于以图形化方式编写一系列操作。通过 “App 开发器”中的 “录制代码”功能，或将模型文件另存为 MATLAB® 或 Java® 格式，即可录制该操作序列并将其另存为传统编程语句列表。本节将概述由 COMSOL 底层语言定义的以下元素类别：

- 常数
- 变量
- 函数
- 运算符
- 表达式

以上语言元素既包括内置元素，也包括用户定义的元素。其中运算符不支持用户自定义，表达式则始终由用户定义。

关于保留名称

内置元素具有保留名称，这些名称不能被用户重新定义。如果您尝试将保留名称用作用户定义的变量、参数或函数名称，则输入该名称的文本将显示黄色波浪下划线；将光标悬停在该文本字符串上时，您将收到一条工具提示消息。保留的函数名称仅限用作函数名称，这意味着此类名称仍可用于变量和参数命名，反之亦然。接下来的页面将列出最常用的内置元素及其对应的保留名称。如需更详细的内置元素列表，请参阅 *Programming Reference Manual* 和 *Application Programming Guide*。

App 中使用的变量

您可以在 App 中使用模型参数和变量，例如，可以允许 App 用户更改参数的值。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
双精度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]
Bohr 半径	a0_const	4*pi*epsilon0_const*hbar_const^2/(me_const*e_const^2) (m) (5.2917721054432e-11[m])
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	mu0_const*c_const (ohm) (376.73031341044[ohm])
电子质量	me_const	9.109383713928e-31[kg]
元电荷	e_const	1.602176634e-19[C]
法拉第常数	F_const	N_A_const*e_const (C/mol) (96485.33212331[C/mol])
精细结构常数	alpha_const	7.297352564311e-3
万有引力常数	G_const	6.6743015e-11[m^3/(kg*s^2)]
理想气体摩尔体积（在 273.15 K 和 1 大气压下）	V_m_const	R_const*273.15[K]/1[atm] (m^3/mol) (22.413969545014e-3[m^3/mol])
中子质量	mn_const	1.6749275005685e-27[kg]
真空磁导率 （磁常数）	mu0_const	2*alpha_const*h_const/(c_const*e_const^2) (H/m) (1.25663706126471e-6[N/A^2])
真空介电常数（电常数）	epsilon0_const	1/mu0_const/c_const/c_const (F/m) (8.85418781882671e-12[F/m])
普朗克常数	h_const	6.62607015e-34[J*s]
普朗克常数除以 2 pi	hbar_const	1.0545718176462e-34[J*s]
质子质量	mp_const	1.6726219259552e-27[kg]
真空中的光速	c_const	299792458[m/s]
斯蒂芬 – 玻尔兹曼常数	sigma_const	(pi^2/60)*k_B_const^4/(hbar_const^3*c_const^2) (W/(m^2·K^4)) (5.67037441918443e-8[W/(m^2*K^4)])
通用气体常数（摩尔气体常数）	R_const	N_A_const*k_B_const (J/(mol·K)) (8.3144626185324[J/(mol*K)])
维恩位移定律常数	b_const	h_const*c_const/k_B_const/4.965114231744276 (m·K) (2.89777195518517e-3[m*K])

参数

参数是用户在模型树的**全局定义**分支中定义的常数标量，其典型应用场景包括：

- 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

参数可定义为由数字、参数、内置常数，以及参数和内置常数的内置函数所构成的表达式。除非参数为无量纲量，否则应使用 [ ] 为单位进行赋值。

变量

“模型开发器”中使用的变量分为两种类型：内置变量和用户定义的变量。变量可以是标量或场量，并支持指定单位。

注：空间坐标变量和因变量属于具有特殊用途的用户定义变量。它们的默认名称分别基于几何空间维度和物理场接口自动生成。根据为这些变量选择的名称， COMSOL Multiphysics 会自动创建一系列内置变量：包括对空间和时间的一阶和二阶导数。下表列出了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
concompid	一个整数值，用于唯一标识几何实体的每个相连组件，涵盖的实体类型包括：域、边界、边和点。	场变量
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	网格单元号，按类型划分	场变量
meshelementall	网格单元号	场变量
meshtype	网格单元的网格类型索引，即单元的边数。	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表示为 dnx 和 unx， y 方向和 z 方向同理。	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	为每个单元定义的标量场变量，其取值为该单元对应 reldetjac 变量的最小值。 如果某个单元的 reldetjacmin 值小于零，则表示该单元发生了内外翻转；即该单元是一个反转的网格单元。	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，并且 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，用于在接近零时需要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)

名称	描述	语法示例
real	实部	real(u)
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，用于需要在接近零点附近计算的表达式	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

这些内置函数与内置数学函数的特性有所不同，它们可能不适合出现在入门简介文档中，但为了完整列出保留名称，仍在此处予以列出。有关更多信息，请参阅 *Reference Manual*。

名称	名称	名称	名称
adj	d	lintotalavg	stddev
at	depends	lintotalpeak	subst
atlintotalpeak	dest	lintotalrms	substval
atlocal	dflux	linzero	sum
atonly	diskavg	mean	test
at0	diskint	nif	timeavg
at1	down	nojac	timeint
at2	dtang	noenv	timemax
at3	elemavg	novar	timemin
atent0	elemgpmax	noxd	treatasconst
atent1	elemgpmin	patcheval	try_catch
atent2	elemint	pd	uflux
atent3	emetric	pint	up
atpmax	env	pmax	var
atpmin	error	pmin	with
attimemax	*frame*.dt	ppr	withparam
attimemin	fsens	pprint	withsol
atxd	fsensimag	prev	
atxd0	gpeval	psum	
atxd1	if	reacf	
atxd2	integrate	realdot	
atxd3	isdefined	residual	
ballavg	islinear	*scope*.atenti	
ballint	isnan	*scope*.ati	
bdf	jacdepends	sens	
bndenv	laginterp	setconst	
centroid	lindev	setind	
circavg	linper	setval	
circint	linpoint	shapeorder	
circumcenter	isinf	side	
cubeint	linsol	sphavg	
cubeavg	lintotal	sphint	

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	函数名称即为其标识符，例如 `an1`。 该函数为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)`。 该函数可包含任意数量的变元。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如： `an1(x,y)`
插值	函数名称即为其标识符，例如 `int1`。 插值函数由表格或文件定义，其中包含离散点处的函数值。 文件格式如下：电子表格、网格或分段。 该函数可包含一到三个变元。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如： `int1(x,y,z)`
分段	函数名称即为其标识符，例如 `pw1`。 分段函数由多个函数拼接而成，每个函数定义在一个区间上。定义变元、外推与平滑方式，以及各段函数及其对应区间。 该函数只有一个变元，在不同区间具有不同的定义；各区间不得重叠，也不得有间隙。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： `pw1(x)`

模板名称	变元和定义	语法示例
高斯脉冲	函数名称即为其标识符，例如 `gp1`。 高斯脉冲函数根据以下表达式定义一条钟形曲线 $y(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ 该函数由均值参数 x_0 和标准差 σ 定义。 该函数只有一个变元。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： `gp1(x)`
斜坡	函数名称即为其标识符，例如 `rm1`。 斜坡函数是从指定时间开始，以用户定义的斜率线性增加的函数。 该函数只有一个变元，并支持平滑处理。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： `rm1(x)`
矩形波	函数名称即为其标识符，例如 `rect1`。 矩形波函数在某一区间内取值为 `1`，其余位置为 `0`。 该函数只有一个变元，	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： `rect1(x)`
阶跃	函数名称即为其标识符，例如 `step1`。 阶跃函数表示在某个位置从 `0` 突变为另一个值 （幅度）的过程。 该函数只有一个变元，并支持平滑处理。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： `step1(x)`
三角波	函数名称即为其标识符，例如 `tri1`。 三角波函数在某一区间内线性上升后再线性下降，其余位置取值为 `0`。 该函数只有一个变元，并支持平滑处理。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： `tri1(x)`

模板名称	变元和定义	语法示例
波形	函数名称即为其标识符，例如 wv1。 波形函数是一种周期函数，可具有多种典型形状：锯齿波、正弦波、方波或三角波。 该函数只有一个变元，并支持平滑处理。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： wv1(x)
正态分布	函数名称即为其标识符，例如 nd1。 定义正态分布的概率密度函数、累积分布函数及分位数函数。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： nd1(x)、 nd1_cum(x) 和 nd1_cum_inv(x)
随机	函数名称即为其标识符，例如 rn1。 随机函数可生成均匀分布或正态分布的白噪声，并可通过一个或多个变元模拟白噪声。 该函数可包含任意数量的变元。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。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）	外部函数用于定义可连接一个或多个 C 语言函数 （这些函数亦可作为包裹函数，用于调用 Fortran 等其他语言编写的源代码）的接口。此类外部函数可用于连接用户创建的共享库等。请注意，共享库文件的扩展名因平台而异：.dll (Windows)、 .so (Linux) 或 .dylib (macOS)。	调用时使用函数名称，并在括号内列出相应数量的变元。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® 函数可连接一个或多个以 MATLAB® 语言编写的函数。只要安装了 LiveLink™ for MATLAB® 和 MATLAB®，此类函数即可像 COMSOL Multiphysics® 中定义的其他任何函数一样使用。（MATLAB® 函数在运行时由 MATLAB® 进行计算。）	调用时使用函数名称，并在括号内列出相应数量的变元。例如：`mymatlabfunc(a,b)`
高程	函数名称即为其标识符，例如 `elev1`。 用于从数字高程模型导入地理空间高程数据，并将高程数据映射为 x 和 y 的函数。 DEM 文件包含地球表面某一区域的高程数据。生成的函数本质上类似于基于网格的插值函数。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如：`elev1(x,y)`
图像	函数名称即为其标识符，例如 `im1`。 用于导入图像（支持 BMP、JPEG、 PNG 或 GIF 格式），并将图像的 RGB 数据映射为标量（单通道）函数输出值。默认情况下，函数输出使用映射 (R+G+B)/3。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如：`im1(x,y)`
最小二乘拟合	函数名称即为其标识符，例如 `lsq1_fun1`。 用于进行最小二乘函数逼近，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、本地表格或结果表格。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如：`lsq1_fun1(x1,x2)`

模板名称	变元和定义	语法示例
高斯过程	函数名称即为其标识符，例如 gpm1。 用于多维插值和代理模型训练。通过高斯过程回归方法，定义一个或多个基于输入数据训练的函数。输入数据可以是文件或结果表。 注：训练**高斯过程**函数需要“不确定性量化模块”；如果使用的模型已包含训练好的**高斯过程**函数，则无需任何附加产品。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如： gpm1(x1,x2)
多项式混沌展开	函数名称即为其标识符，例如 pce1。 用于多维插值和代理模型训练。通过“多项式混沌展开”方法，定义一个或多个基于输入数据训练的函数。输入数据可以是文件或结果表。 注：训练**多项式混沌展开**函数需要“不确定性量化模块”；如果使用的模型已包含训练好的**多项式混沌展开**函数，则无需任何附加产品。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如： pce1(x1,x2)
深度神经网络	函数名称即为其标识符，例如 dnn1。 用于多维插值和代理模型训练。通过**深度神经网络**方法，定义一个或多个基于输入数据训练的函数。输入数据可以是文件或结果表。	调用时使用函数名称，并在括号内以逗号分隔列出变元。例如： dnn1(x1,x2)

模板名称	变元和定义	语法示例
部分分式拟合	函数名称即为其标识符，例如 `pff1`。 用于对频域响应进行有理逼近。基于此逼近，可对其逆傅里叶变换进行解析计算，从而获取时域脉冲响应函数。 输入数据可以是文件或结果表。输出为复值。	调用时使用函数名称，并在括号内列出单个变元。例如： `pff1(x)`
函数 Switch	函数名称即为其标识符，例如 `sw1`。 Switch 用于在求解器扫描过程中切换全局函数。您可以将函数作为子节点添加到 **Switch** 节点下。函数 switch 本质上类似于编程语言中的 switch 语句，即根据某个参数动态选择其下属分支之一，该参数可通过**函数扫描**研究由求解器控制。此外，您也可以在**材料**下添加 **Switch** 节点，并使用**材料扫描**对一组离散材料进行扫描。	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、作用域
2	`^`	幂
3	`! - +`	一元运算：逻辑非、负号、正号

优先级	符号	描述
4	[ ]	单位
5	* /	乘法、除法
6	+ -	二元运算：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	导入	导出
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	导入	导出
AutoCAD®[1,2,3]	.dwg	是	是[8]
Inventor®[1,2,3]	.ipt,.iam	是	是[8]
NX®[1,2]	.prt	是	否
PTC Creo Parametric™[1,3]	.prt,.asm	是	是[8]
Revit®[3,4]	.rvt	是[9]	是[8]
Solid Edge®[3,5]	.par,.asm	是[9]	是[8]
SOLIDWORKS®[1,2,3]	.sldprt,.sldasm	是	是[8]
DXF （3D[1,2] 和 2D）	.dxf	是	是[9]
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[2,6]	.CATPart,.CATProduct	是	否
VRML, v1[7]	.vrml,.wrl	是	否
STL	.stl	是	是
3MF	.3mf	是	否

文件类型	扩展名	导入	导出
PLY	.ply	是	否

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

[2] 仅支持在 Windows® 和 Linux 操作系统上导入

[3] 仅 Windows® 操作系统支持在 COMSOL Multiphysics 与链接的 CAD 程序之间同步文件

[4] 需要 LiveLink™ *for* Revit®

[5] 需要 LiveLink™ *for* Solid Edge®

[6] 需要 “CAD 导入模块”（或 “设计模块”，或者以下任一款 LiveLink™ 产品：AutoCAD®、 Inventor®、 PTC Creo Parametric™、 Revit®、 Solid Edge® 或 SOLIDWORKS®）和 File Import for CATIA® V5

[7] 限于单个几何域

[8] 使用链接的 CAD 软件包进行文件导入 / 导出，前提是原始 CAD 几何是在该 CAD 软件包中创建的

[9] 仅支持导出二维几何对象，包括三维中的工作平面对象

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	导入	导出
IPC-2581[1]	.cvg,.xml	是	否
ODB++[1]	.zip,.tar,.tgz,.tar.gz	是	否
GDS[1]	.gds	是	否
OASIS	.oas	否	是[4]
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”

[4] 仅支持导出二维几何对象，包括从三维中的多个工作平面同时导出对象

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，也可以将材料数据导出为 COMSOL 原生 XML 格式。从 MPH 文件导入材料数据时，系统仅读取文件中的材料明细。如需将材料数据导出为 MPH 文件格式，只需通过**文件**菜单中的选项保存 MPH 文件即可。

“化学反应工程模块”和“等离子体模块”可以读取 CHEMKIN® 文件，用于模拟气相中的复杂化学反应。“等离子体模块”还可以读取 LXCAT 文件，以获取电子碰撞截面数据集。“金属加工模块”则支持从 JMatPro® 软件导入材料属性。

文件类型	扩展名	导入	导出
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	导入	导出
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	导入	导出
VRML, v1	.vrml,.wrl	是	否
VTK	.vtu	否	是

图像、电影和音频

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。三维绘图的三维表示可以导出为 glTF™ 格式，用于三维场景交换。音频文件能够以 WAVE 音频文件格式进行导入和导出。

文件类型	扩展名	导入	导出
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	.mp4	是[2]	否
OGV	.ogv	是[2]	否
PNG	.png	是	是
TIFF	.tif,.tiff	否	是
WAVE	.wav	是	是
WEBM	.webm	是[2]	是

[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	导入	导出
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

本软件支持读取网格、分段及电子表格文件类型，用于定义插值函数。此外，也可通过读取并使用分段和电子表格文件来定义插值曲线，并支持将数据写入此类文件以导出结果。同时，软件支持将表格复制并粘贴为电子表格格式文件，并能够以纯文本、逗号分隔值或数据文件等形式导入和导出参数与变量。

CGNS （CFD 通用符号系统）是 CFD 分析数据的标准。借助 COMSOL 软件的“声学模块”或“CFD 模块”中的 CFD 数据 (CGNS) 功能，可以导入符合此标准的数据文件。

您可以通过连续和离散颜色表文本文件，自定义结果可视化中使用的颜色表。

此外，软件还可读取数字高程模型 (DEM) 文件，将其用作参数化曲面来定义几何形状。

文件类型	扩展名	导入	导出
复制粘贴电子表格格式	n/a	是	是
Excel® 电子表格 [1,2]	.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
CGNS[2,3]	.cgns	是	否
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®

[2] 仅适用于 Windows®

[3] 需要 “声学模块”或 “CFD 模块”

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* Solid Edge®	否	否	是
LiveLink™ *for* SOLIDWORKS®	否	否	是

[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。