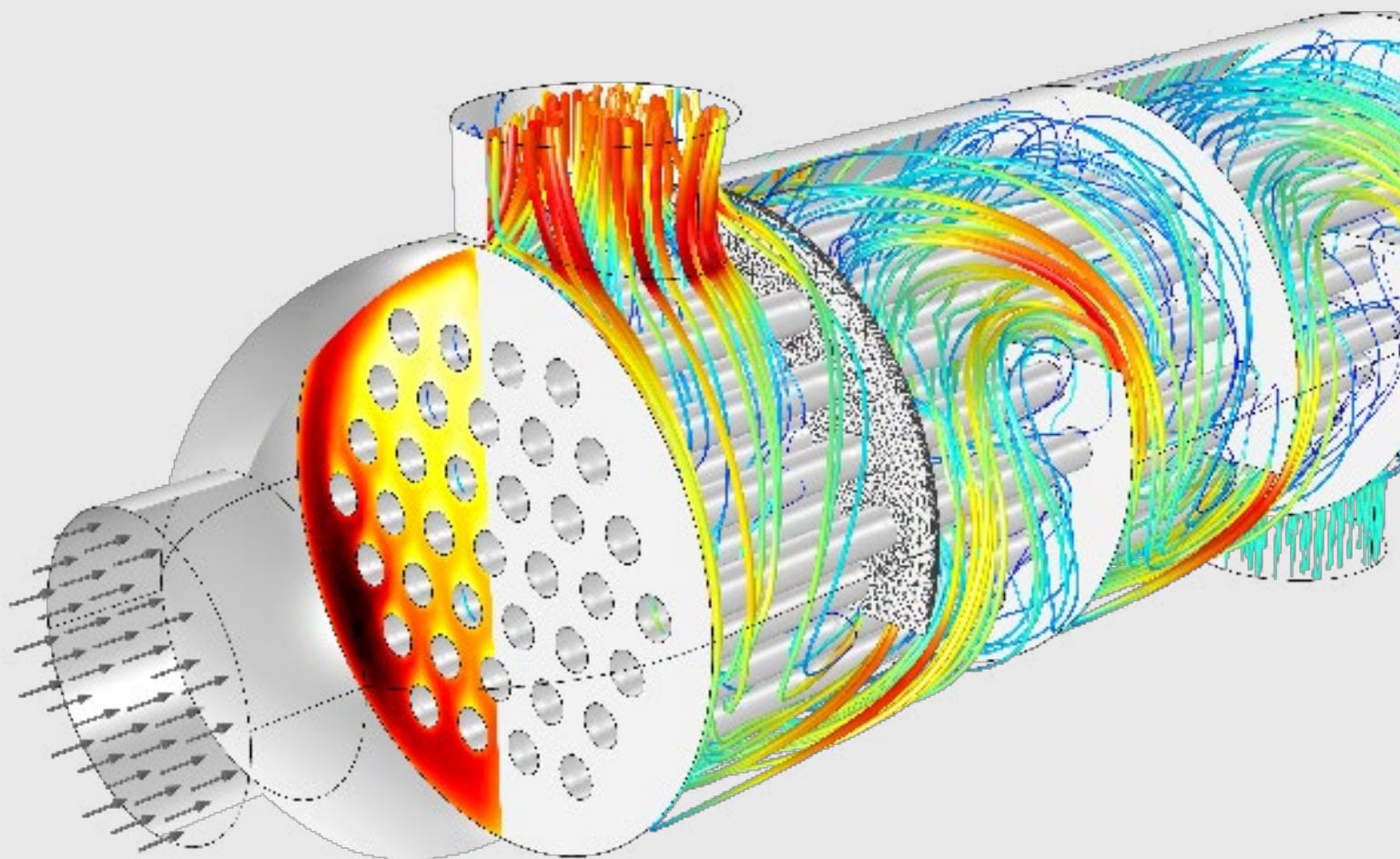


# COMSOL Multiphysics®后处理与可视化综述



## **COMSOL Multiphysics 后处理与可视化综述**

COMSOL、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、LiveLink，和 COMSOL Server 是 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均属其各自所有者所有，并且 COMSOL 及其子公司和产品并不从属于这些商标的所有者，或受其认可，或接受其赞助，或受其支持。

© 2014年11月

### **联系信息**

请点击 [www.cn.comsol.com/contact](http://www.cn.comsol.com/contact) 访问联系 COMSOL 页面。在此页面，您可以进行一般咨询、联系技术支持、或查询我们的联系地址与电话。您同时还可以点击 [www.cn.comsol.com/contact/offices](http://www.cn.comsol.com/contact/offices) 访问全球销售办公室页面，查询联系地址和信息。

如果您需要联系技术支持，可以点击 [www.cn.comsol.com/support/case](http://www.cn.comsol.com/support/case) 访问 COMSOL Access 页面在线填写申请表 [www.cn.comsol.com/support/case](http://www.cn.comsol.com/support/case)。

### **更多资源**

更多有关 COMSOL 后处理的文字说明和教程参见：

#### **视频**

[www.cn.comsol.com/search/?s=postprocessing&subset=video](http://www.cn.comsol.com/search/?s=postprocessing&subset=video)

#### **博客**

[www.cn.comsol.com/search/?s=postprocessing&subset=blog](http://www.cn.comsol.com/search/?s=postprocessing&subset=blog)

#### **社区**

[www.cn.comsol.com/community/forums/results-and-visualization/](http://www.cn.comsol.com/community/forums/results-and-visualization/)

#### **技术支持知识库**

[www.cn.comsol.com/support/knowledgebase/](http://www.cn.comsol.com/support/knowledgebase/)

# 目录

---

简介	1
数据集、派生值与表格	
■ 解	2
■ 截点与计算	3
■ 表格	6
绘图类型	
■ 选择一个绘图类型	8
■ 三维绘图	8
■ 二维绘图	15
■ 一维绘图	21
使用后处理解释结果	24
导出结果	
■ 数据、表格与网格	25
■ 报告	27
操作提示与技巧	
■ 快捷方式	28
■ 重新排列 COMSOL Desktop	28
■ 在表面图中显示网格	29
■ 滑动与交互式定位	30
结束语	31

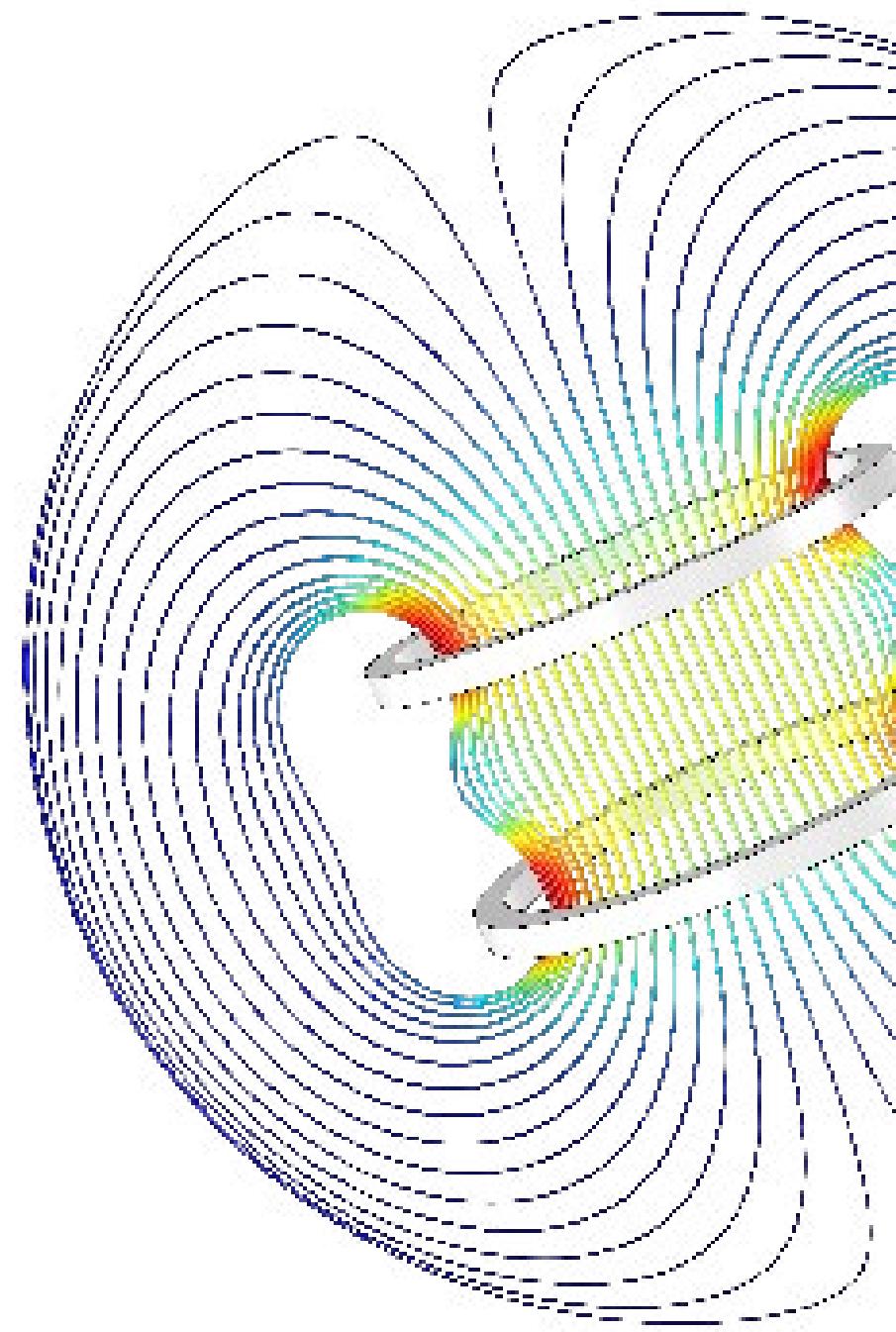


# 简介

对计算机建模所得的对象进行定位、着色和调整，有助于更好地展示研究对象的几何、功能以及可行性。在工业设计中，可视化是非常重要的一个环节。仿真结果的可视化展示，可以帮助我们了解器件或产品设计中涉及的物理现象和过程，比如，传热分析中，颜色深浅表示的温度高低显示了温度场的分布；结构分析中，失效点的位置清晰可见；流体分析中，可以追踪流体的运动轨迹，等等。

COMSOL Multiphysics® 软件的后处理和可视化工具，是您更好地理解仿真结果的一大助力，它可以帮您了解研究对象中发生的物理现象和过程，并向同事、合作方以及客户清晰直观地展示您的研发成果。本手册中的案例为您演示了结果可视化的众多技巧，帮助您分享成果，交流设计理念，探讨设计中遇到的局限和挑战。此外，仿真建模尤其有助于产品原型制造前的设计验证工作，这些技巧也可以帮助您快速分析材料、设计尺寸以及其他参数对产品质量的影响。

为了回应广大 COMSOL® 用户对于高效运用 COMSOL 软件后处理和图形工具的需求，我们编写了本材料。希望这里所介绍的各类技巧能够满足您的要求，启迪您探索产品功能展示的新方式，探索工作中遇到的物理现象，以及隐藏在这些现象之后的神奇的物理世界！



## 亥姆霍兹线圈

一对具有相同直径的圆形线圈平行放置，线圈间距为线圈半径；并且以特定的方式缠绕确保流过两个线圈的电流同向。仿真结果显示线圈之间形成均匀的磁场，磁场的主要分量与线圈的轴向平行。

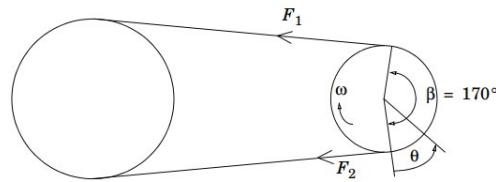
# 数据集、派生值与表格

说起来有点矛盾，虽然我们将研究 COMSOL® 软件中用于创建可视化结果的技术细节，但我们必须从数字开始——需要可视化处理的数据。本章将主要介绍用于绘制结果图的数据集、派生值与表格。

## 解

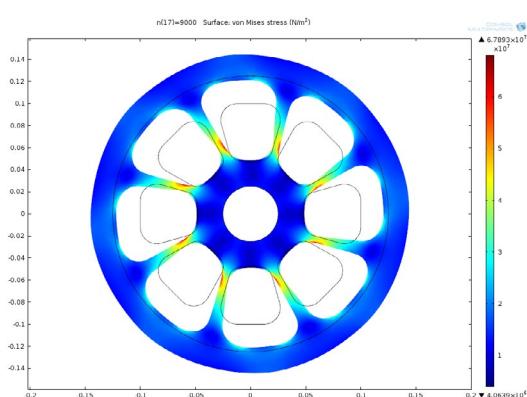
'解'是由求解器储存的数据集，与所选用的求解器、求解的分量（对于多个组分量的模型）、求解过程中用到的时间步长或其他变量值有关。每个完成求解的模型至少包含一个解。

这里将以传动滑轮应力分布模型为例，介绍数据集、派生值与表格的用法：



## 提示

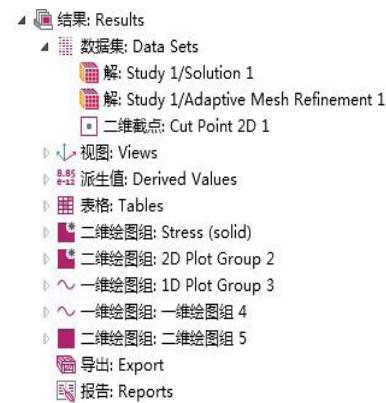
复制并粘贴解这一操作可以非常方便地切换绘图的视图，例如显示不同时刻或者不同位置的计算结果，具体操作会在后文详细介绍。（复制并粘贴解这一操作仅会增加解的视图，并没有增加数值求解器中的底层数据，因此不会加大内存用量。）



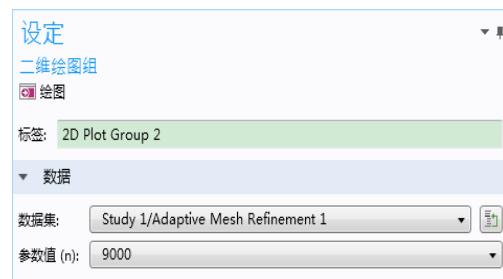
本例采用动态静力学分析方法进行求解，该方法假定在某一时刻皮带是“静止”的，并且滑轮的中心固定。我们可以研究不同转速下滑轮的应力分布和形变，其中转速由变量n定义，单位为转/分(rpm)。

打开 COMSOL Multiphysics® 软件，点击‘文件’>‘案例库’并打开滑轮应力模型，路径为：‘COMSOL Multiphysics’>‘Structural Mechanics’。

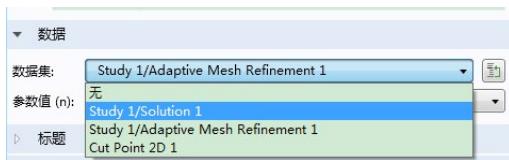
已完成求解的模型‘结果’节点如图 3 所示：



‘数据集’下包含 ‘Study 1 / Solution 1’ 和 ‘Study 1 / Adaptive Mesh Refinement 1’ 两个解，它们是同一个‘求解’得到的不同结果数据集。其中 Study1 / Adaptive Mesh Refinement 1 对应自适应网格求解步骤，自适应网格对模型中精度要求较高的区域自动细化网格。



如果检查‘结果’节点的前两个绘图组（名称分别是“应力 (solid)”和“二维绘图组 2”），可以看到它们的绘图数据来源分别对应于 ‘Study 1 / Solution 1’ 和 ‘Study 1 / Adaptive Mesh Refinement 1’。这两张图显示了不同转速下滑轮的应力分布，转速可以在参数值 (n) 编辑框中设定。将‘数据集’切换为 ‘Study 1 / Solution 1’ 后绘图，可以看到网格细化对计算结果的影响。



让我们来看一下模型中的其他数据集。

## 截点与计算

### 截点

'截点'是在解中创建的点数据集，不会影响模型的几何。截点数据集可用于计算截点所在位置的变量值。本模型中，可利用它来绘制不同转速 (rpm) 下某个点的应力，查看转速会如何影响应力。

截点可以放置在模型几何的任何位置。截点坐标可在设定区调整。

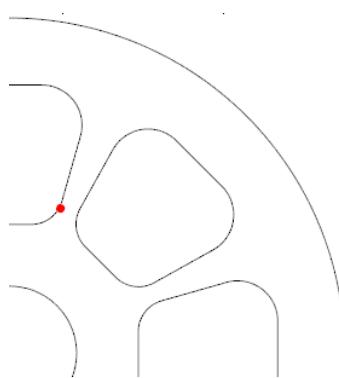
本模型中，点 (0, 0) 位于滑轮中心。



### 提示

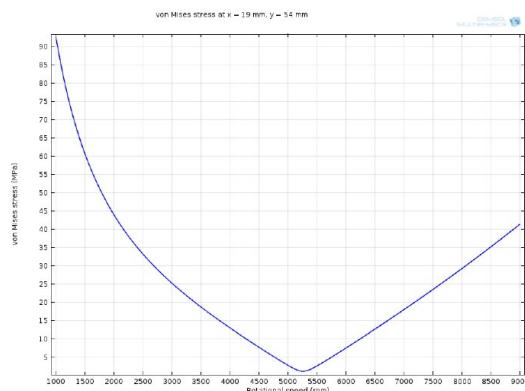
对于'截点'，‘抓取到最近边界’是一项非常有用的功能，勾选该复选框可以将截点移动到离所选坐标最近的边界上，这将有助于在某条几何边上创建截点。

前往'二维截点 1' 节点，并点击'绘图'。截点将在'图形'窗口中滑轮截面的右上角显示，并沿着某一开口的边缘 (仅显示了四分之一)：



我们之后将使用该点创建一些新的绘图。现在看一下'结果'节点中的'一维绘图组 3'。

选定的'数据集'是'二维截点 1'，结果显示了坐标 (19, 54) mm 处的应力如何随转速变化，其中坐标单位为毫米。



## 注意

本指南中提到的所有模型均可在 COMSOL 案例库中找到，所有 COMSOL® 用户都可使用。如果您目前没有使用 COMSOL，可访问 [www.cn.comsol.com/contact](http://www.cn.comsol.com/contact) 联系我们。关于 COMSOL 各模块功能的详细信息，您可以在 [www.cn.comsol.com/products](http://www.cn.comsol.com/products) 中找到。

本指南假定您已更新 COMSOL 案例库。具体方法如下：点击'文件' > '帮助' > '更新 COMSOL 案例库'，然后点击 'Find Models'。如果您只想下载某个特定案例，请在下一页中点击 'Uncheck all'，然后浏览到您想要下载的案例并点击下载，本例中，滑轮应力分析的案例路径为'COMSOL Multiphysics' > 'Structural Mechanics' > 'Stress in Pulley'。

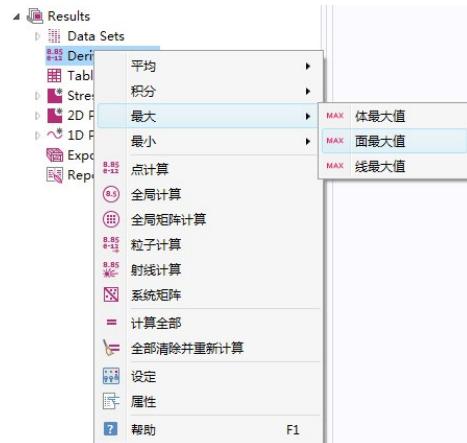
### 截线和截面

这里使用了'截点'计算特定位置处的变量；同样，'截线'可以用于沿指定线计算变量和可视化结果。'截面'可用来在三维下创建可视化的截面表面图。

## 派生值

我们已查看了当前模型中存在的所有数据集。本小节将讨论'最大'、'最小'、'积分'以及'点'和'全局计算'。这些计算能用于控制结果绘图所需的数据。

右击'结果'节点下的'派生值'可以看到一个可计算值的列表。让我们来找出截面上的最大应力。

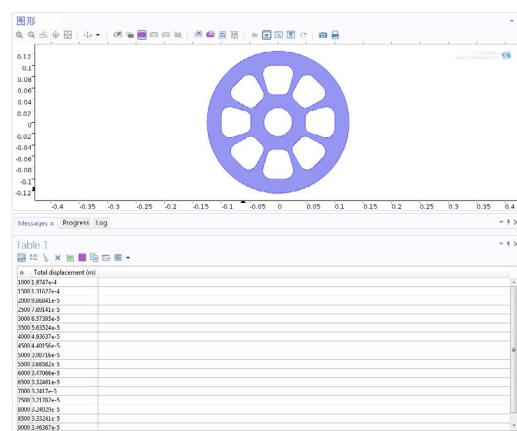


## 更多派生值

可以计算线或体上给定变量的其他最大值和最小值。  
'平均'和'积分'可以采用类似方法计算，右击'派生值'节点，您可以在显示的选择列表中看到这些选项。

这使我们能够在表面上计算所选变量的最大值。在'面最大值'设定窗口，我们将从'数据集'中选择'Study 1' / 'Adaptive Mesh Refinement 1'（这个结果更为精确）。在'绘图窗口'中点击滑轮截面，设定选择为'域 1'。

'表达式'下的缺省表达式为 *solid disp* (位移，亦即形变)，单位为 *m*。点击设定窗口顶部的计算 =，这将生成一个包含两列数据的表格，给出每个转速对应的最大总位移。



我们也能在这个表格中增加多个变量。在表达式输入框中输入 *solid.mises*，或者点击'替换表达式'按钮 并选择'结构力学' > '应力' > 'von Mises 应力 (solid.mises)'。更改单位为 *Mpa* 并点击'计算'。

'表格 1' 将如下图所示，显示不同转速下的最大位移和最大应力值。

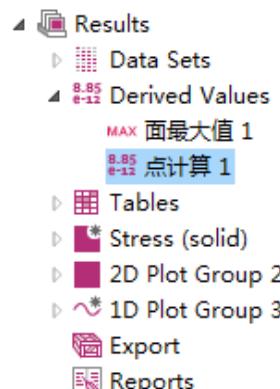
n	总位移 (m)	von Mises 应力 (MPa)
1000.0	1.9746E-4	118.69
1500.0	1.3162E-4	78.016
2000.0	9.8681E-5	56.890
2500.0	7.8912E-5	46.978
3000.0	6.5738E-5	41.801
3500.0	5.6351E-5	39.003
4000.0	4.9363E-5	37.822
4500.0	4.4014E-5	37.837
5000.0	3.9870E-5	38.793
5500.0	3.6857E-5	40.530
6000.0	3.4706E-5	42.939
6500.0	3.3245E-5	45.946
7000.0	3.2416E-5	49.498
7500.0	3.2178E-5	53.596
8000.0	3.2492E-5	58.172
8500.0	3.3324E-5	63.226
9000.0	3.4637E-5	68.734

瞧！我们得到了所要的数据。

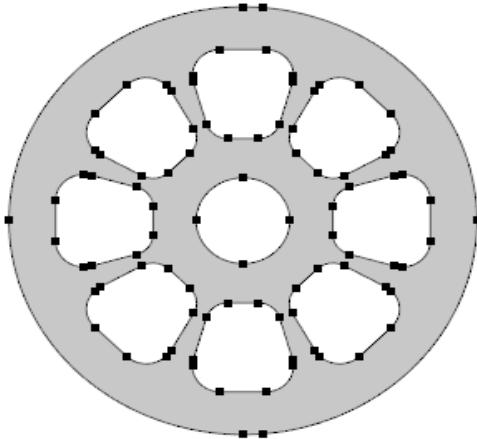
## 点计算

现在让我们创建一个'点计算'，'点计算'用于求某个特定点的变量或者表达式（我们刚才找到的最大值则针对整个域）。「点计算」也可以用来求多个点的变量值，例如可用于探索模型不同位置处的变形。

右击'派生值'并选择'点计算'。



在'图形'窗口显示的几何中，一组点将出现在滑轮的截面上，这些都是绘制在模型几何上的点。在'点计算'中，我们不能像在'截点'中那样选取任意位置的点，必须选取这些点中的一个或多个。



点击'图形'窗口中的点即可选中该点，让我们选择滑轮中心孔(0, 0)左右两侧的点。

当您点击它们(点 36 和 55)时，其名称会添加到选择列表。将表达式改为 *Solid.mises*，并将单位改为 MPa，然后点击'计算'。

表格 2	
8.85	von Mises 应力 (MPa), 点: 36
8.85	von Mises 应力 (MPa), 点: 55
1000.0 15.749	16.743
1500.0 10.526	11.122
2000.0 7.9443	8.2945
2500.0 6.4455	6.5971
3000.0 5.5284	5.4967
3500.0 4.9973	4.7905
4000.0 4.7685	4.4033
4500.0 4.7990	4.3080
5000.0 5.0557	4.4825
5500.0 5.5058	4.8922
6000.0 6.1186	5.4955
6500.0 6.8689	6.2554
7000.0 7.3777	7.1437
7500.0 8.7114	8.1416
8000.0 9.7808	9.2366
8500.0 10.939	10.421
9000.0 12.183	11.689

现在我们创建了'表格 2'，其中显示不同转速下两个点上的应力。

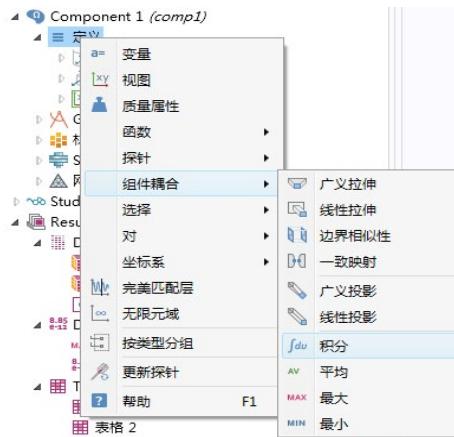
## 全局计算

由于滑轮在转动过程中会发生轻微弯曲和形变，因此滑轮的直径并不是一个定值。怎样才能测得其直径随旋转速度的变化呢？

我们将创建一个变量来描述截面的形变，这可以通过测量两点间距在不同转速下的变化来实现。为此，我们将用到'全局计算'。

首先，创建两个'积分'节点，我们将在每个点上分别计算积分，它们可以给出各个点上函数(我们将在后面定义)的值。

展开'组件 1'和'定义'节点，右击'定义'，选择'组件耦合' > '积分'，重复该操作两次。



点击'积分 1'节点。和我们之前创建'点计算'时类似，'图形'窗口现在将显示滑轮几何中的所有点。对于本计算，我们将再次选择距中心最远的左右两侧的点。

在'几何实体层次'下，选择'点'。点击选中最右侧的点(点 90)。

前往'积分 2'节点，同样将'几何实体层次'设为'点'，这次选择最左侧的点(点 1)。

现在，我们需要创建我们所希望测量的变量。再次右击'定义'节点，并选择'变量'。在'变量表格'中，在'名称列'输入 diam，在'表达式列'输入  $intop1(R+u)-intop2(-R+u)$ 。

## 变量说明

大多数情况下函数中不需要保留变量 R，本案例这么做是为了求解滑轮直径。变量表达式  $intop1(u)-intop2(u)$  也能正确求解，但结果表示两点变形之差。

我们刚刚所创建的变量将测量给定转速下的直径。请注意我们使用了  $R$  和  $-R$  来说明两个方向 ( $0$  的左侧和右侧)。

右击 'Study1' 并选择 '更新解'。由于这个模型已经求解完成，我们需要更新结果。COMSOL 支持您添加这个组件耦合，然后调整当前已有的解来得到结果，而不需要整个模拟重新计算。(如果您在模拟计算完成后才发现忘了定义变量和耦合，'更新解'这项操作会非常有帮助。)

现在让我们回到 '结果' 节点。右击 '派生值'，选择 '全局计算'。在表达式编辑框中输入  $diam-2*R$ ，这表示初始直径  $2*R$  和我们刚才所创建新变量之间的差，给出了单位为米的变形。

点击 '计算'，自动新建的 '表格 3' 显示了变形。当转速  $n$  小于 2500 时，计算结果为负值，说明直径减小；当  $n$  等于 2500 时，结果开始变为正值，并且随着  $n$  的增加迅速增大。

我们完成了全局计算。

## 表格

基本上完成了！我们已经了解几种从求解器收集和组织数据的方法，下面我们将总结几点关于有效使用表格的建议。

您可能已经注意到，我们每次计算都会自动新建表格，表格中储存了来自数据集和派生值的信息。下面总结一下我们在滑轮模型中新建的表格：

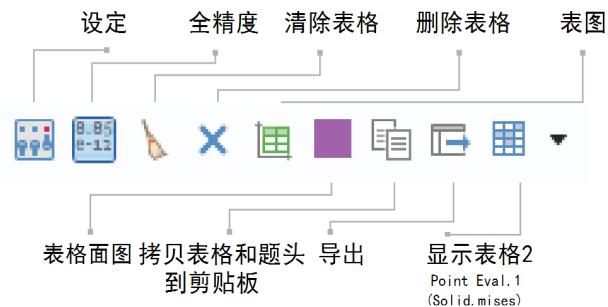
- 二维截点数据 1 的计算结果，我们绘制了不同转速下点 (19, 54) 的应力随转速变化的曲线。

## 提示

您也可以从数据文件中导入表格。右击结果下的 '表格' 节点并选择 '表格'，然后通过设定窗口中的 '导入' 按钮，导入文本或者数据文件。这在比较实验数据和仿真结果时非常有用。

- 不同转速下滑轮截面的最大应力和最大位移。
- 通过全局计算创建的显示两点间距变化的表格。

简单介绍一下表格的几个快捷方式。



任何表格窗口顶部的标题下，都可以看到以下图标显示。

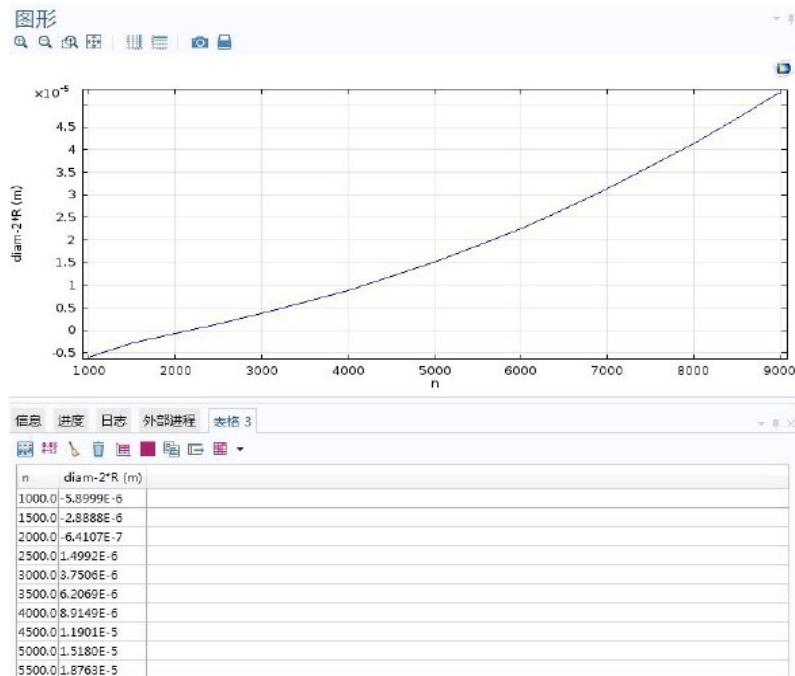
有些按钮的含义非常明确，以下是对部分按钮的说明：

- 设定：在软件界面中央打开表格设定窗口。
- 全精度：显示完整的值(全小数位)。
- 表图：绘制基于表格数据的图表(稍后会详细介绍)。同理，'表格面图'按钮用于绘制表格数据所描述的面图。
- 输出：将表格数据输出为文本文件 (.txt)。
- 显示：显示 '表格' 节点中的下一个表格，点击右侧的箭头将显示至今为止所有已创建表格的列表，用户可以在它们之间进行切换。

最后强调一下，在检查某一时刻或者特定参数下的计算结果时，表格非常方便有效，例如显示一个解如何从初始值变为最终值。我们也可以利用表格内的数据进行绘图，下文将通过上一章最后全局计算所得的表格为例进行说明。



右击'结果'并选择'一维绘图组'，右击新节点'一维绘图组 6' 选择'表图'。(此外还可以通过点击'表格窗口'下的'表图'按钮完成上述操作。)从'表格选择列表'中选择'表格 3' 并点击'绘图'。



表格和图像结果都显示了形变如何随转速提高而增加。

# 绘图类型

现在我们有了数据，也学到了一些数据的使用和处理方法。接下来让我们进入一个非常有趣的部分：图形化显示结果。

## 选择一个绘图类型

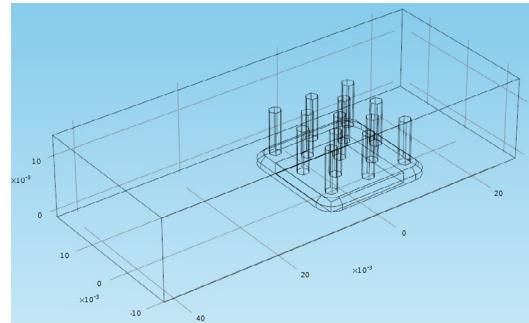
COMSOL® 附件相当灵活，例如您可以根据二维模型创建三维绘图。这种拉伸操作是一个非常强大的工具，让您可以更近距离地观察器件中的物理现象。但是什么时候您需要这样做？什么样的应用需要这样做呢？有时候，对结果可视化的最佳绘图类型选择会与您的直觉不同。在把精力放在这方面之前，我们将先介绍一下创建绘图的基础知识；然后再来讲那些华丽的部分。

我们先从最真实的绘图类型开始，通过它，我们才能对实际生活中的对象进行三维可视化显示。因为降低维度很容易理解——二维和一维绘图常常是由三维绘图的截面来创建——所以我们将使用三维模型来研究尽可能多的绘图技巧。

## 三维绘图

让我们以用作电路组件冷却的铝制散热器为例，如果您有传热模块或 CFD 模块，可以在案例库中找到这个模型：'文件' > '案例库' > 'Heat Transfer Module' > 'Tutorial Models', 'Forced and Natural Convection'，或者'文件' > '案例库' > 'CFD Module' > 'Non-Isothermal Flow'。其中还附有模型文档，包含创建仿真的详细步骤。

这个模型是一个很好的案例，理由之一是其中包含了足够的物理场！模型研究了流体流动和传热。散热器由铝制成，其中包括一族散热柱，安装在一块硅玻璃板上。它位于一个有空气流入和流出的矩形通道中。开始时，散热器底部有 1 瓦的热量流入，热量由外部热源产生。



模型分析了热传导、对流，以及表面上的温度场。

您可以展开'结果'节点并点击 'Temperature (nittf)' 绘图组，找到温度图。但因为我们将会重新创建它，因此先把它删除(右击，并选择删除)。我们同样把'Velocity (nittf)' 绘图组也删除掉，因为之后也会重新创建它。

另一个我们要删除和重新创建的重要部分是视图。最终结果只显示有限的几何——隐藏了部分矩形通道。正如我们将要看到的，像这样隐藏实体是一个很有用的技巧，有助于显示模型内部的物理场。

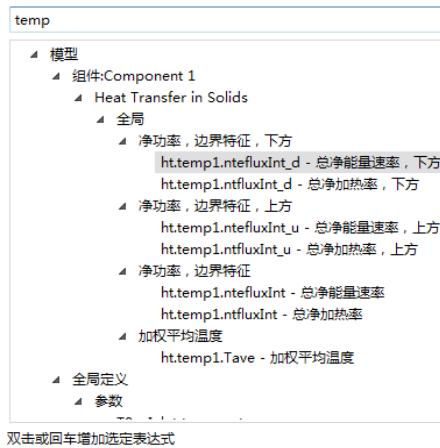
暂时，让我们恢复视图以显示完整几何，以便研究隐藏组件。展开'组件 1' > '定义' > '视图 1'，删除'隐藏几何实体 1' 节点。

## 表面图

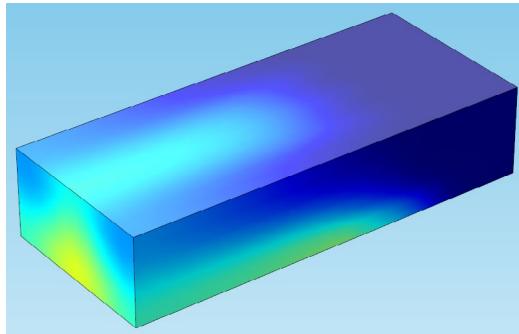
我们在散热器几何上创建的第一个绘图是表面图，用来显示通道内的温度变化。右键点击'结果'节点，选择'三维绘图组'。右键点击刚刚创建的节点，然后选择'表面'。

我们想要的表达式（温度）已经在编辑框中了。如果需要自行添加，可以点击'替换表达式'，然后选择'共轭传热 (Heat Transfer in Solid) > 温度 (T)'。

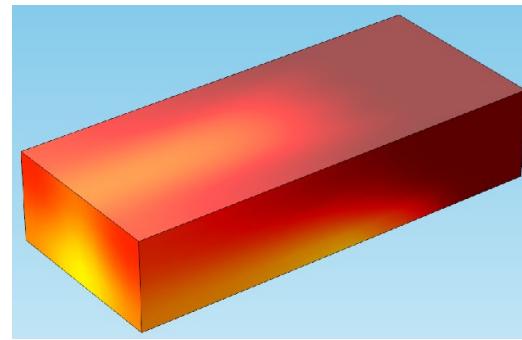
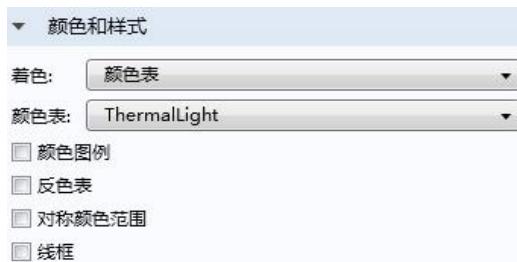
如果您不记得所需表达式的位置，可以在表达式窗口最上方的编辑框中输入关键词进行搜索：



点击‘绘图’。我们现在已经有了一个表面图，不过坦率地说，这丝毫不像我们想要的最终结果！不过，我们可以调整视图和绘图设定，直至得到希望的结果。因为颜色表缺省设为 Rainbow，所以这个框看上去和之前所显示的结果有很大的不同。



在‘表面’的设定窗口中，我们可以在‘颜色和样式’标签下更改这一设定。点击下拉列表，将颜色表从 ‘Rainbow’ 更改为 ‘ThermalLight’。



看起来好一些了！不过，我们还是看不到通道内发生了什么。还记得我们从‘视图1’中删除了‘隐藏几何实体’节点吗？让我们再回去看一下。

## 提示

另一种查看适用于具体绘图组的视图节点的方法是，选中该绘图组（例如‘三维绘图组1’），然后查看‘绘图设定’标签。在‘视图’部分您可以更改用于该绘图组的视图，或点击下拉箭头旁边的按钮直接跳转到视图。

## 隐身斗篷：隐藏实体

在某些情况下，能够隐藏几何中的某些部件有助于我们更好地观察内部情况——尤其是在周围有空气域环绕的复杂模型几何中，比如散热器！很多时候，您在设定结果时并不希望看到空气框。其他一些时候，您也可能希望获得显示隐藏于其他几个几何组件之下的器件内部视图。接下来我们将频繁使用这非常实用的后处理技巧。

回到‘视图 1’节点，右击该节点并选择‘隐藏几何实体’，在‘几何实体次’的设定窗口中，选择‘边界’。（您也可以隐藏点、边，以及域。）

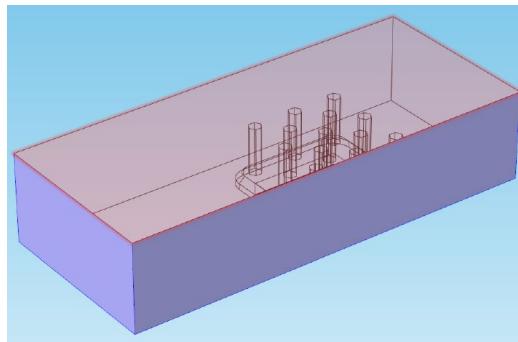
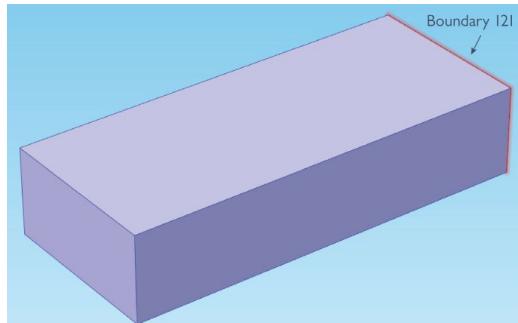
## 实体 VS. 对象

软件中还提供了一个‘隐藏几何对象’的选项，它将隐藏由几何特征所创建的对象。隐藏几何对象仅可用于特定节点，比如‘视图’和‘定义’节点。隐藏几何对象的动作不会在‘材料’、‘物理场’、‘网格’和‘结果’节点体现，因此如果您不是在操作‘模型树’的‘几何分支’，‘隐藏几何实体’会是更好的选择。

现在选择通道中遮挡了散热器视图的三个面（边界 1、2、4）。鼠标悬停于其上时，颜色会变红，点击选中后颜色会变为紫色。

同时再选中边界 121，即通道入口。这可以通过旋转散热器直至该面可见来实现，或在该区域悬停鼠标并滚动滚轮，直到该面的边变为红色。然后点击选中。

对于这类简单几何，旋转模型并选中另一侧上的面很容易实现。但对于复杂几何，或被其他面遮盖、且无法从模型外部访问的面，鼠标滚轮（如果您的鼠标没有滚轮，也可以使用箭头键）提供了一个更简单的方法来循环浏览实体。当您精心调整好视图，不希望重新定位模型时，这项操作会非常有帮助。



如果您将多次选中模型中的相同特征组，或需要仔细选择多个实体，可以使用选择列表旁的‘创建选择’按钮 。

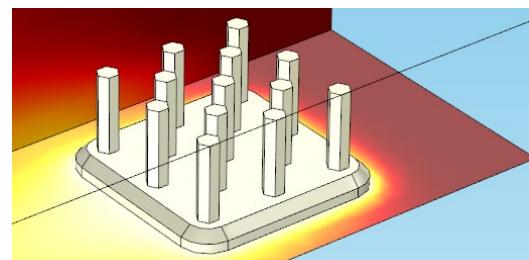


您能定义选择并为其命名。它将显示为‘定义’节点下的一个新节点：

- ▲ 定义
  -  显示: Channel Walls {sel2}
  -  边界坐标系: Boundary System 1 {sys1}
  -  视图: View 1 {view1}

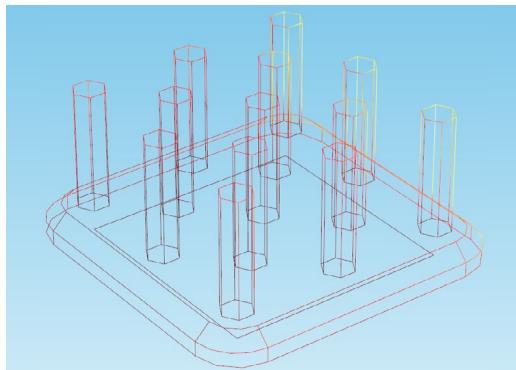
在‘结果’节点下，当创建同样实体类型的选择时，这个新组将作为一个选项出现，因此您无需再次选择这些实体。

回到‘三维绘图组 1’。现在我们可以看到通道内部的情况，不过，让我们先去掉这些线。在‘绘图设定’标签下，取消勾选‘绘图数据集边界’，并点击‘绘图’。现在我们将仅看到表面和几何，不再看到线。



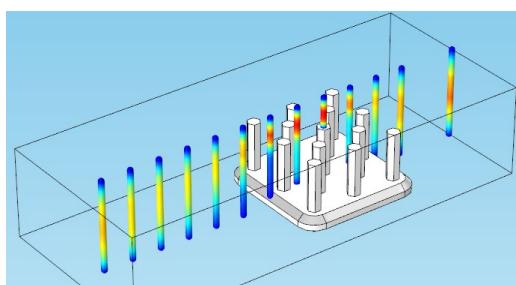
## 线图

虽然我们刚刚取消了对散热器中数据集边的绘图，但我们可以增加一类绘图，即线图来显示结果。线图用于显示边上的物理量；以下线图就显示了散热器域的边上温度：



线图也可用于显示模型中多个位置上的结果。在线图设定窗口的'颜色和样式'标签下，可将线类型设为'线'，或半径手动可调的'管'。

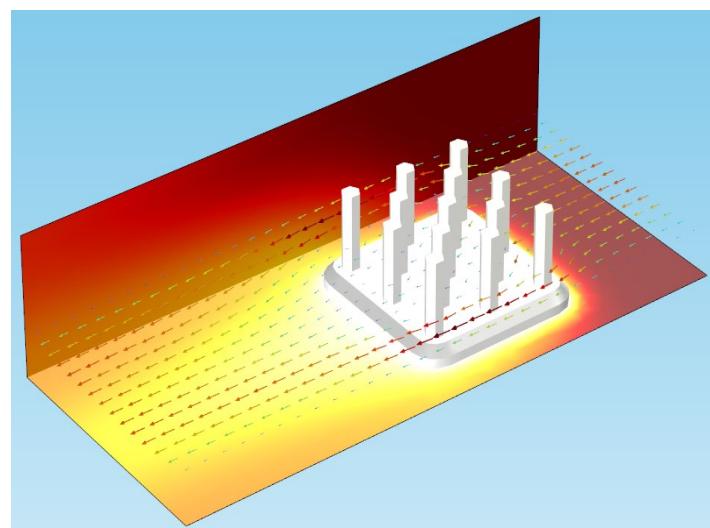
下方的结果图显示了散热器通道中央的绘图，描述了入口和出口之间的空气流速：



这些结果可以通过三维截线解来创建。

## 箭头图

我们将增加的下一个绘图是箭头图。右击'三维绘图组 1'，并选择'体箭头'。这将创建有关流经通道以及散热器周围的气流速度矢量场的箭头图。箭头的长度显示了空气移动的速度——散热器和通道上方处最快，通道底部及散热器底座处较慢。

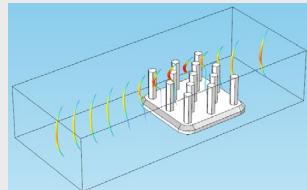


不过，您最初得到的箭头图看起来可能与此不同。如要创建上方所示的图像，您可能需要增加更多的箭头，同时需要缩小这些箭头以使下方的几何可见。

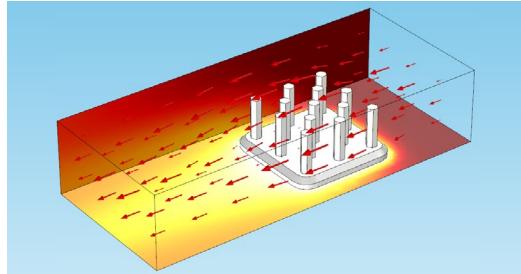
查看一下'箭头位置'标签，其中有 x 格点、y 格点和 z 格点选项。这就是说我们可以更改在 x 轴、y 轴和 z 轴方向上所显示的箭头数量。最理想的箭头数目取决于具体应用，仅就本例而言，将 x 格点更改为 8、y 格点更改为 4，z 格点更改为 4。（真实绘图中，您当然会希望能有更多的箭头以便观察到流场，但这里将每个物体都做得较大，对学习而言会更有帮助。）

## 使用变形

这里所示的线图包含了'变形'以及'半径表达式'。对于'变形'的使用示例，请参考第 18 页。

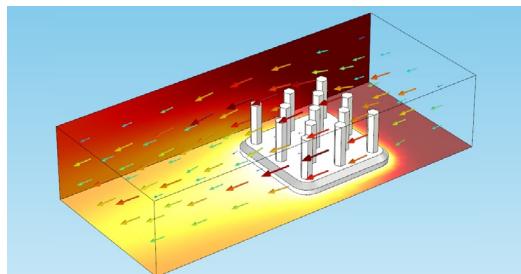


我们可以通过改变'颜色和样式'标签下的'比例因子'来更改箭头大小。勾选'比例因子'复选框，并将它增加到 0.05（同样，这远大于您在实际可视化物理场时会用到的数值）。



现在我们的视图看上去已经非常不错了。让我们向箭头图中增加颜色范围，使速度看起来更加清晰。

右击'体箭头 1'并选择'颜色表达式'。点击'替换表达式'，选择'共轭传热(层流) > 速度大小(nitf.U)'，然后点击'绘图'。



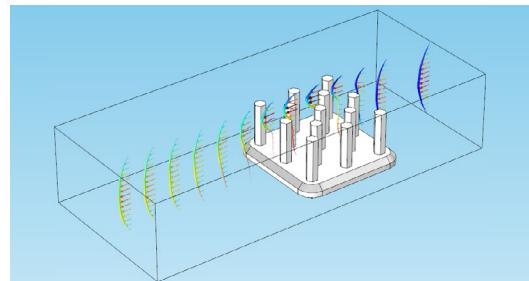
现在我们的箭头图会显示气流在进入和离开通道时的速度变化。在'颜色和样式'标签下，选中'颜色图例'复选框，以便了解最快和最慢流动区域（红色代表最快、蓝色代表最慢）。

本示例显示了一个体箭头图。通过同样的方式，面箭头和线上箭头图可以分别将矢量可视化为平面或线上的箭头。

## 提示

如果我们只希望看到 z 方向上的一层箭头，更改定义方法将有助于实现这一操作。这次不选择'点数'，选择'坐标'。这时您可以将 z 方向所用的点数限制为一个点，并指明它在 z 轴上的位置。例如，尝试在坐标框中输入 5[mm]，观察一下结果如何。

下图显示了在截线解中绘制的线上箭头（以及已变形的常规线图）。



## 等值线图

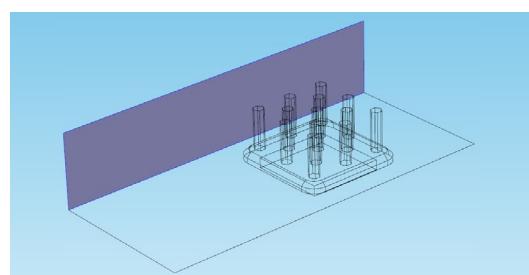
让我们在通道的后壁处增加一个等值线图。等值线图有助于快速判断一个器件是否已接近其极限或会有发生故障的危险（例如，显示相变中的精确温度，或显示接近其屈服应力水平的机械结构）。

如果您还记得，我们之前曾提到过复制并粘贴解。要创建一个等值线绘图，我们需要新增一个解，使等值线不会在模型中的每个位置都出现。

展开'数据集'节点，右击'解 1'，选择'复制并粘贴'。一个新的解（解 2）将出现在数据集列表中。右击'解 2'，并选择'增加'。

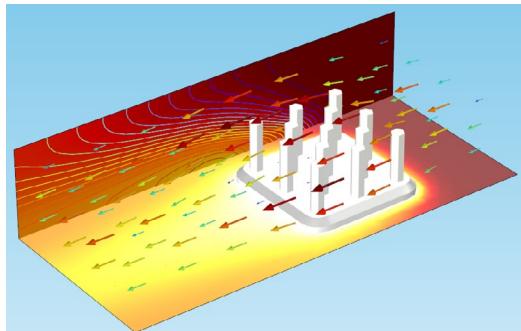
本特征与隐藏几何实体类似，即我们之前为看到模型内部而在'视图'节点进行的操作。对解的选择使您可以选择所希望看到的模型区域，意味着当这个解被用作数据集时，任何未选择的部分将不会用于绘制结果。

将'几何实体层次'设为'边界'，且仅选择通道的后壁。



现在右击'三维绘图组 1'，并选择'等值线'。这将增加一个等值线绘图，请确保在绘图设定的'数据集'中选择'解 2'。

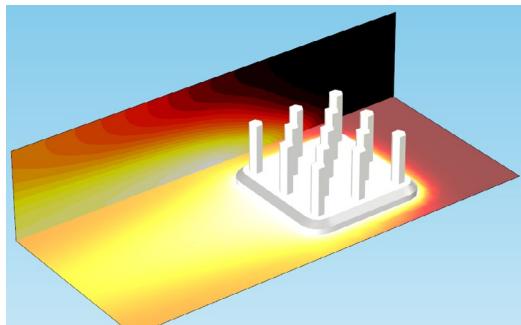
将表达式更改为 "T" (在编辑框中输入)，点击'绘图'。现在我们可以看到显示壁面温度随与通道距离远近而变化的等值线图。



除了线，我们也可以融合等值线以填满每层之间的空间。在等值线的设定窗口中，'查看级别'标签以及'颜色和样式'标签下可用的选项：



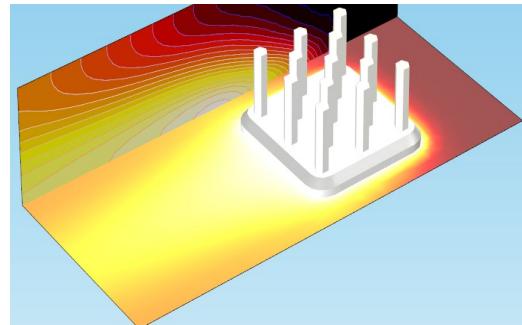
将等值线类型从'线'更改为'填满'，如图所示，同时通过右击'体箭头'节点并选择'禁用'来禁用箭头图。这是我们得到的图像：



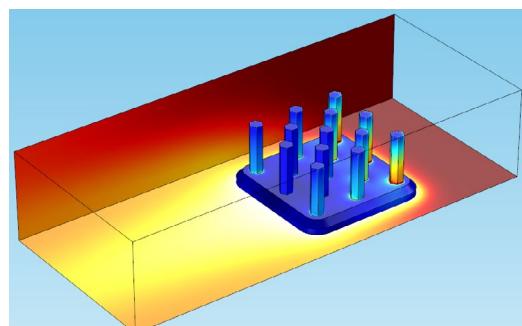
请记住该绘图其实是由两种绘图叠加而来(原始的表面图和等值线图)。在本例中，由于二者有同样的颜色方案，因此不会相互干扰。但在其他一些情况下，这可能会造成问题。(看下您能否调整结果从而使表面图中不再包含后壁。)

现在更容易观察到底发生了什么；等值线层显示了后壁中温度梯度的演变，在靠近散热器的右侧，温度最高。等值线已经非常平滑(尝试下细化网格来获得更平滑的解)，不过让我们先把线加回去以便清楚地了解什么是温度梯度。

'复制并粘贴'您刚刚创建的等值线表面，将其设为显示'线'而非'填满'。继续颜色和设定，创建类似于下图的图像：

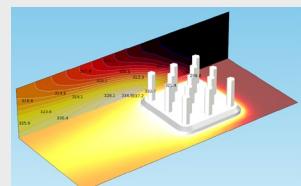


看一下您能否通过在隐藏实体和使用多个表面图方面所学到的新知识来创建如下所示的绘图：



## 提示

尝试点击表面上的任意一点，观察数值表中所显示的点击位置处的温度数据。或者，在等值线绘图设定中，在'颜色和样式'标签下选中'级别标签'复选框，观察每个等值线级别的数据。



## 切片图

我们已经添加了表面、箭头和等值线绘图。现在我们将添加一些不同的功能。

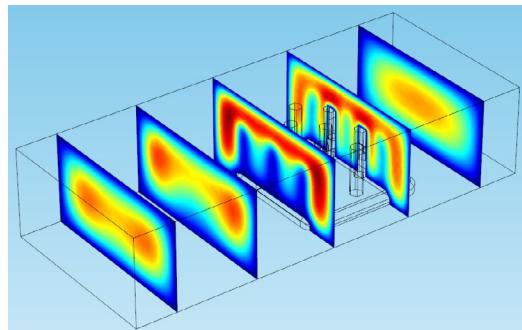
在之前我们删除的速度场绘图中就包含切片图，它可以直观地显示一个变量在不同位置剖面上的变化。例如，本模型中我们可以通过切片图来显示远离散热器的不同切片上温度的变化，或者沿着通道流动的空气速度大小。

让我们来创建一个速度切片图。为避免显示过于拥挤，我们新建一个绘图组来添加切片图，而不是在原来已经生成的绘图组中添加。右击‘结果’节点，添加新的‘三维绘图组’。右击新的绘图组节点并选择‘切片’。

绘图表达式自动选择温度。点击‘绘图’按钮，我们将会看到一系列切片图，通过绘图可以看到在靠近入口的位置温度相对较低，随着靠近散热器温度逐渐升高，在靠近出口的位置温度再次降低。

下面我们把它改成绘制速度大小，正如我们在箭头图中做的那样。我们要把表达式改成‘共轭传热 (Laminar Flow)’>‘速度大小 (nitf.U)’。

现在我们可以得到通道内部不同截面上的空气流速切片图。



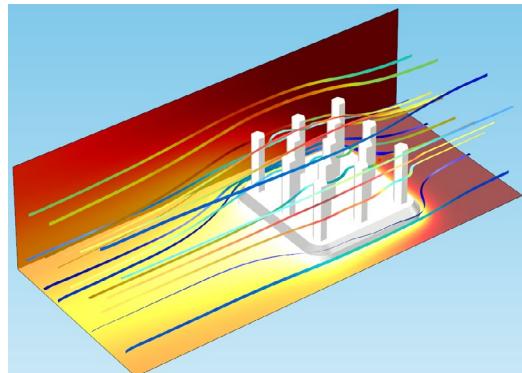
## 流线

流线图通过显示与瞬时矢量场相切的流动曲线来描述相关矢量，常用于描述流体运动。例如，对于散热器模型，我们可以增加流线来可视化经过通道的空气流动。

重置绘图组使同一绘图中仅显示散热器和管道的温度表面图，去掉等值线图。右击‘绘图组’节点选择‘流线’，在表达式中选择‘替换表达式’>‘共轭传热 (固体传热)’>‘速度场 (nitf.ux, nitf.uy, nitf.uz)’。

在‘流线定位’标签下，选择定位为‘大小控制’。在颜色和样式‘标签下，修改线类型为‘条带’。点击‘绘图’，将会看到一系列描述空气流经散热器时速度矢量场的曲线。继续操作，修改条带的宽度和定位间距，直到得到自己满意的流线效果。

我们第一次尝试的视觉效果可能很一般，到处都是红色的。可以右击‘流线 1’节点添加‘颜色表达式’。此外，为了使图像更加直观，颜色表达式可以改为速度大小。选择‘替换表达式’>‘共轭传热 (Laminar Flow)’>‘速度大小 (nitf.U)’，点击‘绘图’。



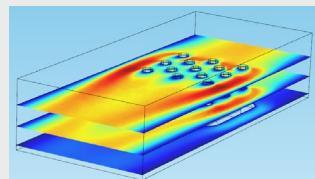
## 等值面

等值面图将结果显示为一组不同颜色的面，每个面上的结果都是常数。这可以用来表示一些标量场，如温度，化学物质浓度，电势或压力等。下面我们来看一个描述扬声器内部声压级的例子。

如果已经安装声学模块，打开 COMSOL 案例库，并浏览至 Acoustics Module > Industrial Models > Vented Loudspeaker Enclosure 以继续操作。

## 切片定位

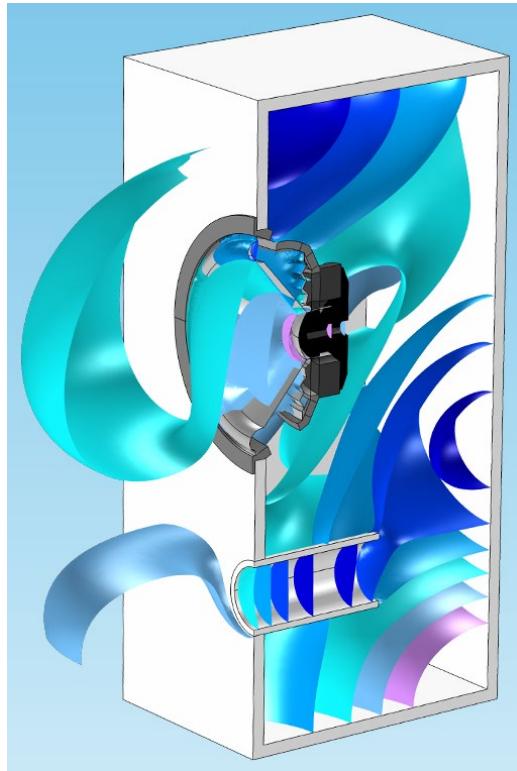
这里显示的是沿 x 方向变化的 yz 平面上的切片图。不过我们可以在平面数据标签下设定中切换不同的切片图。请尝试通过平面定位工具创建下图：



请转到第 28 页的提示与技巧部分，了解更多关于切片图定位的提示，。

该模型研究了扬声器驱动单元的敏感度如何受音箱影响。扬声器驱动单元放置在开口音箱中，包含磁铁、音圈、锥体和其他零件。模拟的空气域被球形完美匹配层 (PML) 包围，后者可以吸收入射的声波，最大限度降低反射，模拟无限大的区域。模型求解不同频率下的声压分布，移动部件的局部应力和应变，以及结构变形。

在'结果'节点下，点击'声压绘图组'，其中包括了'等值面'节点。



您得到的等值面图可能与图中显示的图像有少许差异，因为这里调整了颜色显示范围。

这些等值面显示的是音箱内和扬声器锥体外侧的等压力面，我们可以观察到声波从扬声器向外传播。

## 二维绘图

下面，换一种方式，我们来查看一些二维绘图类型。三维散热器模型中所显示的所有绘图类型均可用于二维绘图，下面我们演示的绘图同样也可用于三维。

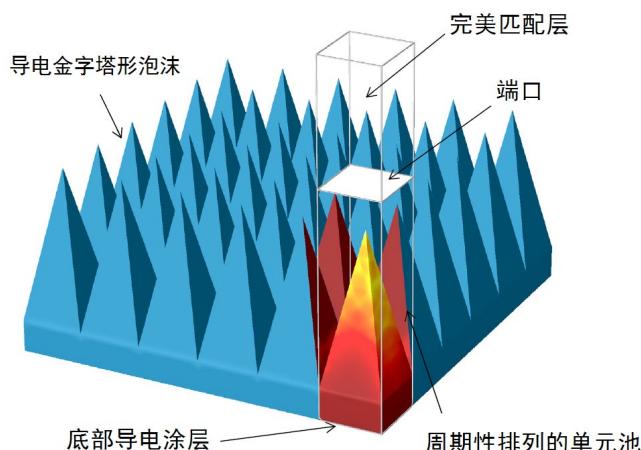
下面我们将使用的演示模型是用于全寂室中的金字塔形微波吸收器。如果已经安装 RF 模块，可通过以下路径找到模型：文件 > 案例库 > RF Module > Passive Devices。

### 吸波暗室

吸波暗室设计用于吸收噪声或者电磁波，从而隔绝此类外部波源。在壁面上排布一定形状的吸收材料，尽可能多地吸收尽可能多的方向上的辐射(如本例)。吸波暗室常用于测试雷达设备、天线，或电磁干扰装置。

金字塔形吸收器实际上是一个三维模型，但为了可视化目的，我们创建了一些二维绘图。模型几何包含一个金字塔形晶胞，周围包括：

- 矩形空气域
- 空气域顶部的完美匹配层 (PML)，创造了一个能避免返回至模拟域的内部反射的边界
- 金字塔体下方的完美电导体 (PEC) 层表示腔壁上的导电涂层



## 截面图

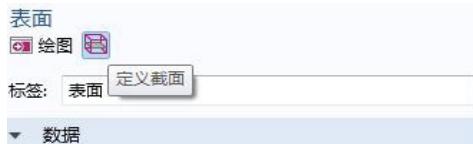
与三维绘图类似，可以在二维中创建表面、箭头和等值线图。但如果想要在三维几何模型中创建二维绘图，首先要有一个平面来绘图。我们将通过定义一个‘截面’来创建一个平面——这类似于滑轮模型中用到的‘截点’。创建的截面是三维模型横截面上的一个面，类似于二维模型的‘解’，我们可以在截面上绘制结果图。

## 降低维度

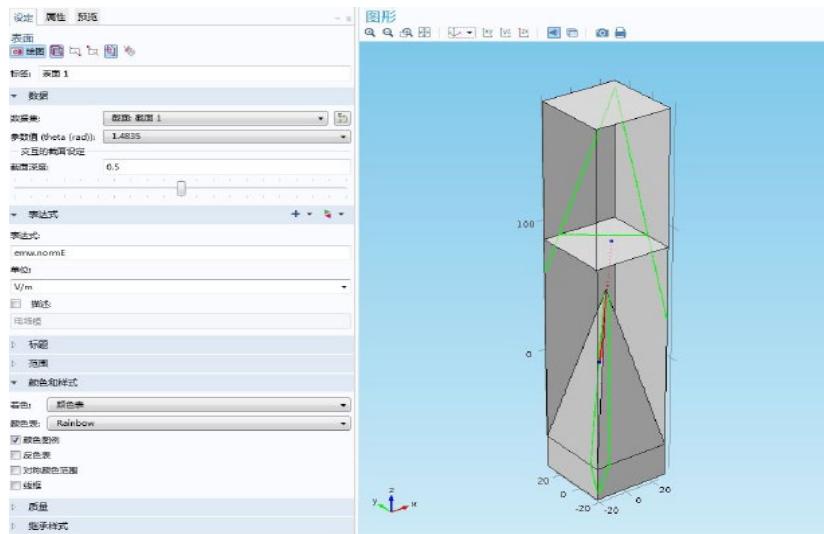
与我们通过在金字塔形吸收器模型上创建截面来得到二维绘图的方法相同，可以通过‘截线’或‘截点’得到一维绘图。这相当于为选中的点（在一系列参数下，例如时间）或线上创建新的数据集。

右击‘结果’，添加‘二维绘图组’，并在绘图组上添加‘表面图’。表达式编辑框缺少输入电场强度模——也就是我们想要绘图的变量。但是如果我们在这时点击‘绘图’，得到的就是空白图像。

查看表面设定窗口顶部，在‘绘图’按钮旁边，将会出现一个新的图标：



由于我们还没有定义一个平面，COMSOL 预计我们将会用到这项操作。点击新的按钮图标，创建一个截面。



这就像一个隐藏的快捷方式，通过该按钮可以生成所需的截面。其中截面与模型几何相交的线显示为绿色。

下面我们通过新数据集的设定来确定该平面，该数据集现在显示为‘结果’结点下的‘截面 1’的方向。

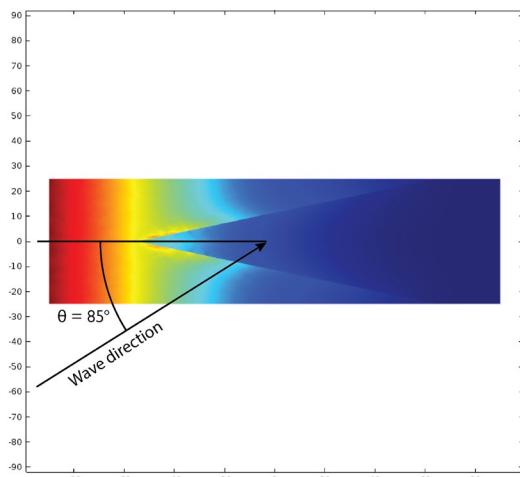


点击‘绘图’，红色的截面将会出现在‘图形’窗口的模型几何中，同时还会出现表示截面法向矢量的蓝色箭头。

我们希望显示金字塔不同区域的电场。在截面设定的‘平面定义方法’中，将‘三点’改为‘点和法线’。新的平面设定应该包含点(0,0,0)和法向矢量(1,0,0)，这将创建一个穿过金字塔中心的垂直截面。

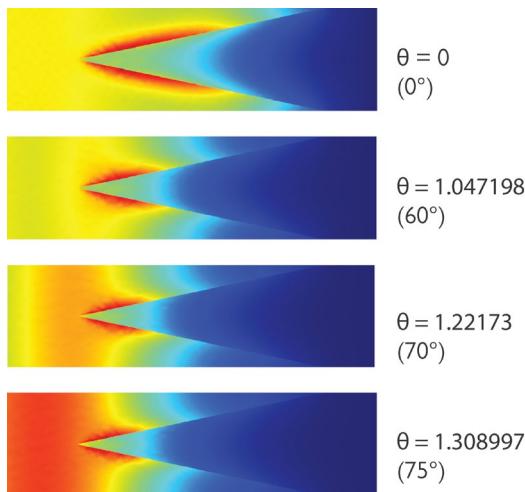
返回‘二维绘图组 3’的‘表面’节点，确保数据集设为‘截面 1’，点击‘绘图’。

得到的结果如图所示：



该表面图基于仰角  $\theta = 1.48353$  (85度)，这也是入射到该金字塔形晶胞中的最大仰角度数(也就是电磁波入射角)。

通过在‘数据’标签下改变‘参数值 (theta)’，可以绘制不同仰角的结果图(每次改变参数值后点击‘绘图’按钮)。

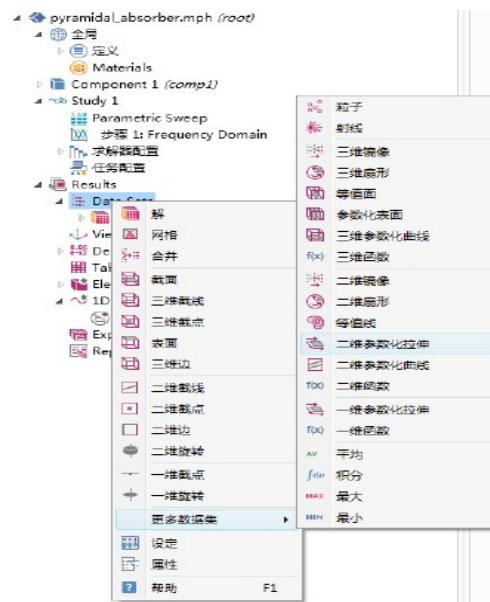


### 周期性阵列

从这些绘图中，我们可以看到电场如何随仰角发生变化。但为了能看到这种变化，我们每改变一次参数就需要点击一次‘绘图’按钮，而且每次只能看到一个结果。如果我们希望并排比较该如何操作呢？此时，就可以用一种周期性阵列来显示不同参数值的结果。

我们将基于这个金字塔形吸波器模型，通过创建参数化拉伸来演示该技巧。参数化拉伸是指通过将一个参数（本例为仰角）作为一个维度来扩展数据集。

右击‘数据集’节点，通过选择‘更多数据集’>‘二维参数化拉伸’来增加一个参数化拉伸数据集：



这将绘制与选定  $\theta$  值对应的解。COMSOL 自动选择‘截面 1’作为解使用：



### 排列方向

无论截面的原始排列方向如何，参数化拉伸都将创建水平层。

点击‘绘图’，您将看到图形窗口中会显示出一系列切片（拉伸）。

我们将在每个切片上绘制一个不同  $\theta$  值的电场。在‘结果’节点下增加一个‘三维绘图组’，选择‘二维参数化拉伸 1’作为数据集，然后增加一个‘表面图’到该绘图组，并点击‘绘图’（表达式编辑框中自动填入电场模）。

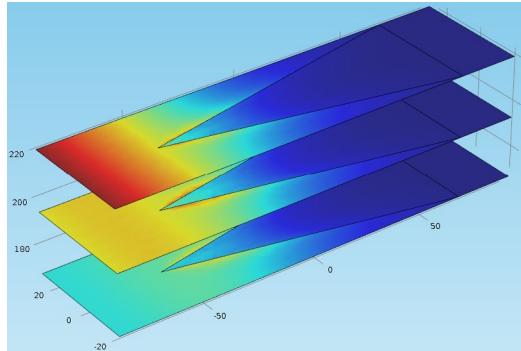
所得的结果图太拥挤了！为了能明确了解在金字塔形晶胞内到底发生了什么，让我们回到‘二维参数化拉伸1’，并减少所查看值的数量。

## 提示

如果您绘制了其他变量，并且想要回到电场图，可以点击‘替换表达式’ > ‘电磁波’，‘频域’ > ‘电’ > ‘电场模 (emw.normE)’，或者直接在表达式编辑框中输入‘emw.normE’，重新绘图。

在‘二维参数化拉伸’设定中，将‘参数选择 (theta)’改为‘来自列表’。按住 CTRL 键，点击选择多个值。向下滚动列表，选择以下值：1.134464、1.308997，以及 1.48353（分别相当于 65、75 和 85 度）。我们来查看较高的仰角，它们的电场改变更大。在‘设定’标签下，勾选‘级别比例因子’复选框，然后输入 150。

现在回到‘三维绘图组 4’，并点击‘绘图’。



我们已经实现了参数化拉伸！不同的切片显示了金字塔晶胞中不同  $\theta$  值的电场。

现在我们可以在二维绘图中把每个切片排列到我们所希望的位置，这样我们就能真正并排查看它们。在‘结果’节点下增加一个‘二维绘图组’，在‘二维绘图组 5’中，浏览到它的视图（‘二维视图 5’）。展开‘二维视图 5’中，点击‘轴’节点。

这些设定控制着图形窗口中显示的 x 和 y 轴的范围。对于该阵列，我们需要更大的空间。

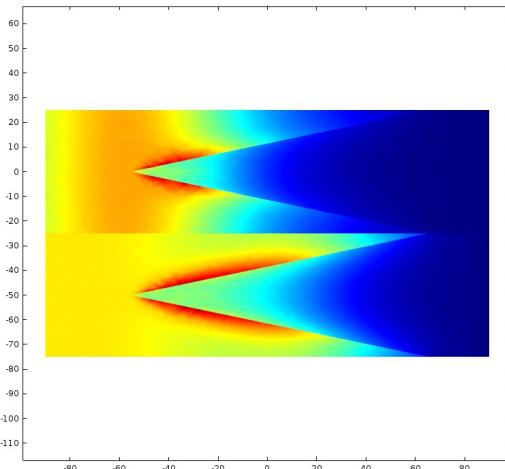
分别将最小 y 和最大 y 坐标调整为 -150, 150。

在‘二维绘图组 5’中增加‘表面图’，并将数据集改为‘截面 1’。在第一个表面图中，选 theta 为 1.22173 (70 度)。点击‘绘图’，我们就可以看到熟悉的表面图。

‘复制并粘贴’表面图 1，在‘标题’标签下设定标题类型为‘无’，删除标题。（这项操作是为了避免绘图组中创建的每一个表面图都会增加标题）。这一次，把参数值设定为‘0’，点击‘绘图’。

第二个表面图恰好覆盖在第一个图的上面，导致我们前面的结果图消失了。因此我们需要增加一个变形，使我们可以并排看到这些结果。

右击新增的表面图节点，并选择‘变形’。我们希望把第二个图移动晶胞宽度的距离，即 50 mm。将 y 分量改为‘-50’，‘比例因子’设为‘1’，然后点击‘绘图’。



您可以通过在 y 轴上查看晶胞的宽度，即为 50 mm，或者浏览‘几何’节点来查看创建模型时的原始尺寸。

现在看起来棒极了！我们将再增加几幅表面图来完成这个阵列。

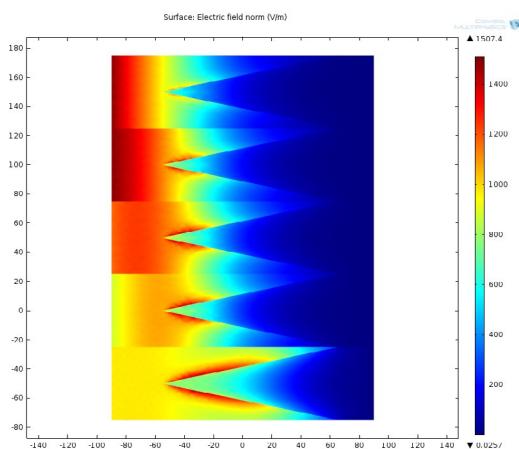
## 参考

如果您需要回顾一下如何通过绘图组查看它的视图，请返回第 9 页。

'复制并粘贴表面 2' 三次，使用以下设定：

节点	参数值 (theta)	变形(y分量)
表面 3	1.308997 (75°)	50
表面 4	1.396263 (80°)	100
表面 5	1.48353 (85°)	150

回到'二维绘图组 5' 节点，在'绘图设定'标签下取消勾选'绘制数据集边界'，然后点击'绘图'。



我们可以看到电场随着我们之前选定的值发生的演化。

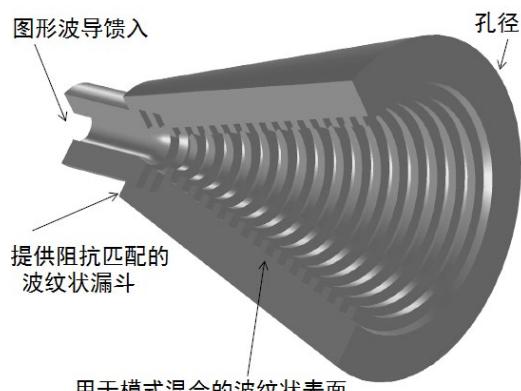
### 旋转和镜像

在一些情况下，没有必要模拟对象的整个几何。例如轴对称结构的几何，就可以使用轴对称模型，这样只需要对截面的一半进行模拟，极大地简化了几何和边界条件，并减少了计算时间。

但当模型求解完成后，最好能显示整个对象的结果。因为我们所见到的物体都是三维的，这将有助于我们排列结果的视角。

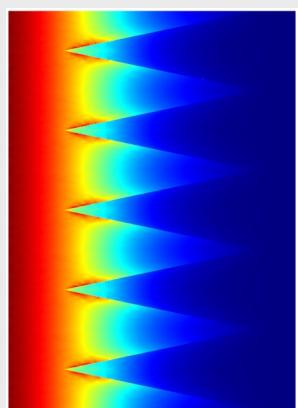
让我们来看一个轴对称天线的例子，如果您安装了 RF 模块，可以浏览至文件 > 案例库 > RF Module > Antennas，然后打开 corrugated circular horn antenna 模型。

这个模型研究了喇叭状天线的横电 (TE) 和横磁 (TM) 模式。喇叭的波纹状内表面产生的 TE 和 TM 模式混合波在天线孔径中提供了线偏振。仿真结果显示了电场和天线周围的辐射图案。

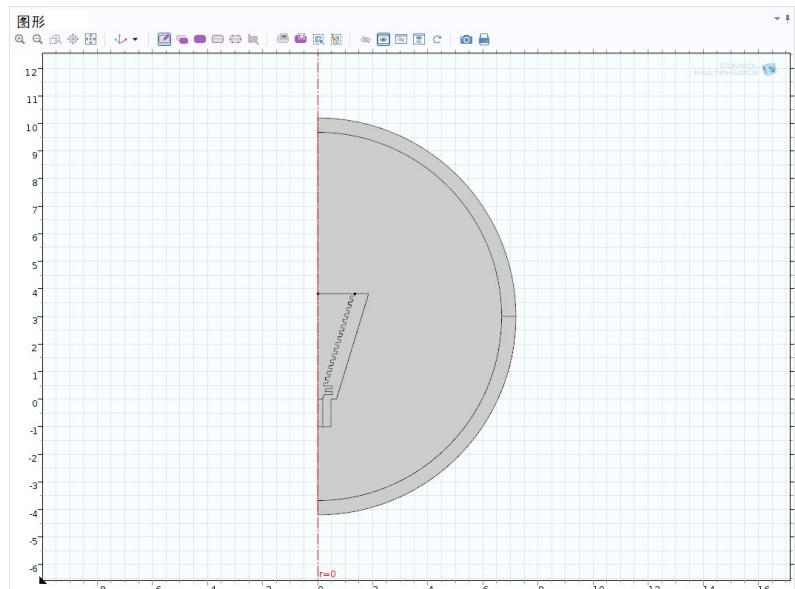


### 重复性图案

为了能为重复性图案创建出一个美观的可视化效果，可以尝试这里的做法，在周期性阵列中为所有参数设定相同的值。例如，下图将所有的表面图都设定为  $\theta = 1.396236$  (75 度)：

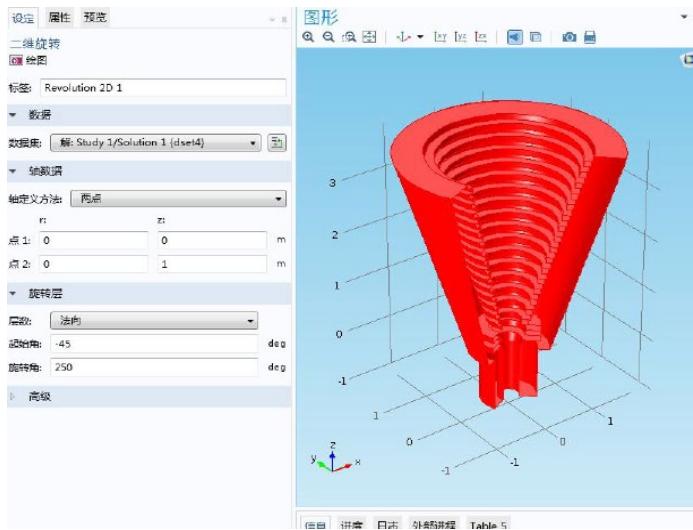


如下图所示，模型的几何简化为二维。

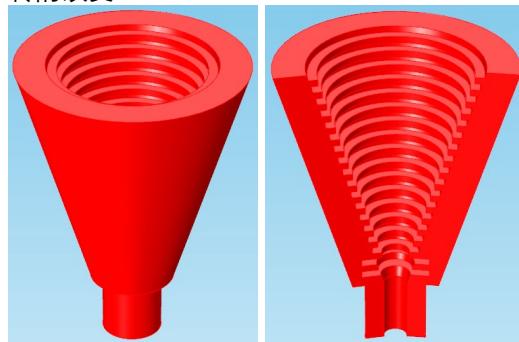


一些数据集中使用了二维旋转，这有助于理解三维器件中的情况。可在'数据集'节点下浏览这些解。'解 1'和'二维旋转 1'包含了整个几何。'解 2' 和 '3' 的旋转分别只包含了波导馈入和孔径，因此它们的绘图看起来像是代表各自开口的平面圆形。这些将在下文重点说明。

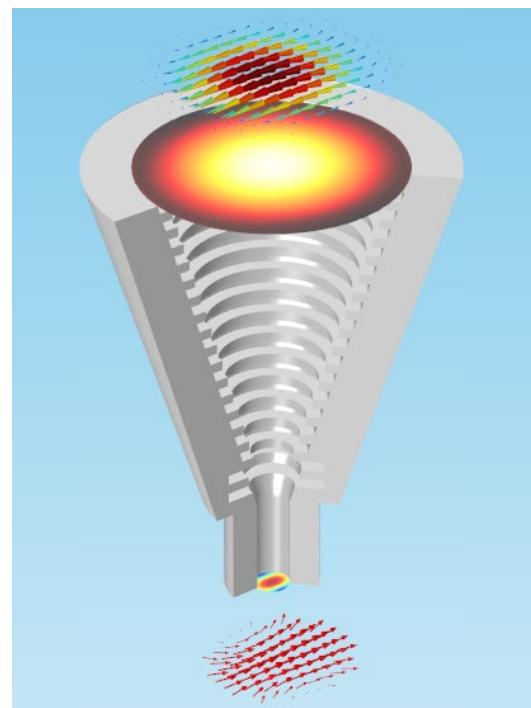
'解 4'依赖于喇叭本身的几何，看一看下面显示的二维旋转喇叭。



'轴数据'和'旋转层'标签包含了用于确定旋转多少度，以及绕哪个轴旋转的信息。在缺省的旋转设定中，解围绕 z 轴旋转 250 度。更改起始角和旋转角，然后点击'绘图'来看看旋转的改变：



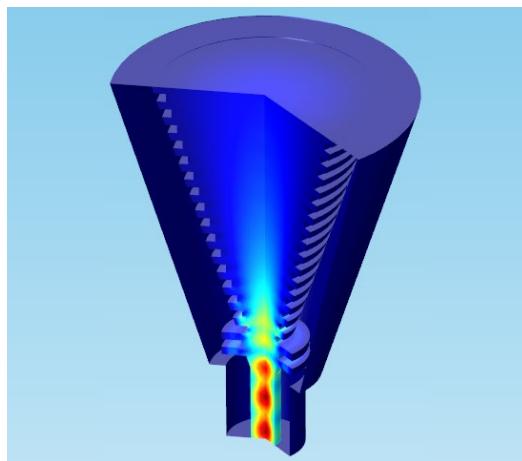
这个绘图组显示了转换到笛卡尔坐标的电场（模型在柱坐标系下创建）。电场模绘制在我之前看到的代表天线孔径和馈入开口的旋转圆上。箭头图显示电场的方向和强度，并且向上和向下略有偏移，这样有更好的视觉效果。



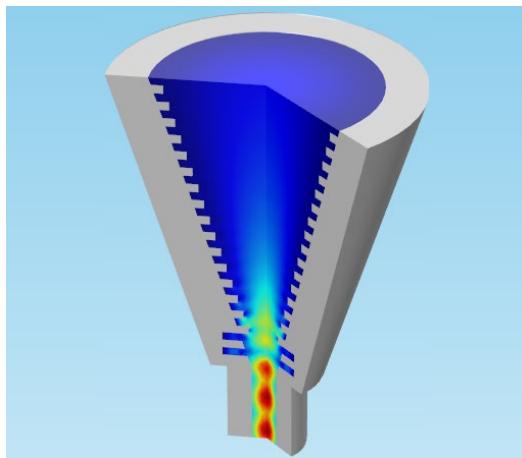
创建一个新数据集，'解 5'，增加一个包含域 3、4 和 6 (喇叭、馈入和孔径) 的'选择'。然后右击'数据集'，选择'二维旋转 1'，并选择'解 5'作为它的数据集，设定起始角为 -90 度，旋转角为 225 度。绘图应如下图所示：



接下来在'结果'节点下增加一个新的'三维绘图组'，并在'数据集'中选择'无'。增加一个'表面图'，并使用刚刚创建的'二维旋转 6 数据集'。这时将自动绘制电场模：



要得到更有趣的图，您可以尝试使用依赖于二维旋转孔径和二维旋转喇叭数据集的表面图。下图中，将孔径的表面图向上移动了 0.001 米。



## 一维绘图

使用一维绘图与使用二维或三维绘图略有差别。多数情况下，一维绘图用于使用线图比表面图更有帮助的情况，或者模型几何不能形成二维绘图的情况。

我们将快速查看一下一维绘图的类型。

从'文件' > '案例库' > 'COMSOL Multiphysics' > 'Equation-based models' 中打开 shallow water equations 模型，这个模型模拟了水底不平坦（例如，湖或池塘底）且水很浅的情况下波的传播。波形作为时间的函数进行模拟。

展开'结果'节点下的'一维绘图组 1'，点击'线图 1'，查看设定。继续向下，试一下操作'颜色和样式'标签中的编辑框。

一维绘图组中有一些特有的绘图特征，例如线样式和颜色，在一维与二维和三维中有不同的含义，因为线形状通常表示变量的变化，而这在二维或三维绘图中通常由表面颜色梯度来表示。

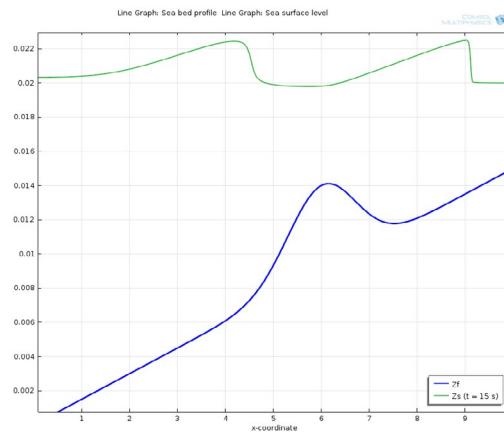
线图的宽度可以通过'颜色和样式'中的选项来增加或减少：



## 提示

对于一些几何，对绘图数据进行镜像操作也很有帮助，例如，在只模拟了一半几何结构的管道模型中。'镜像数据集'可以通过在'数据集'节点右击，选择'二维镜像'，或'三维镜像'来创建，这需要根据几何是二维，还是三维进行选择。

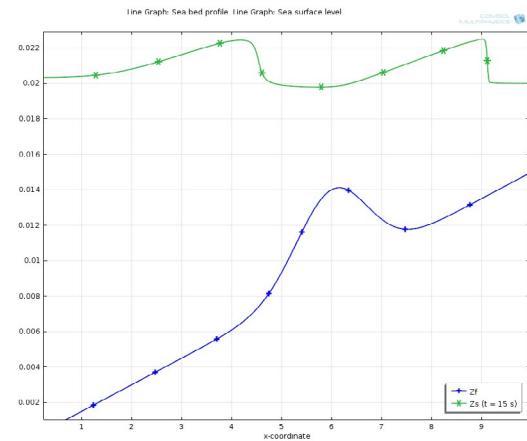
下图显示了'一维绘图组'的'线图 1' 和 '2'，其中'线图 1' 宽度为 3，'线图 2' 宽度为 2。



您可以修改'标记'编辑框，选择标记的样式和数量上的设定，在线图的等间隔数据点上平均放置指示符。



下图显示了'线图 1' 和 '2'，其中'线图 1' 有 12 个加号形状的标记，'线图 2' 有 14 个星号形状的标记。



标签工具是只能用于一维绘图的另一个特征，可以在各自的标签中修改 x 和 y 轴的表达式，以及在'图例'标签中修改图例框中的文字。

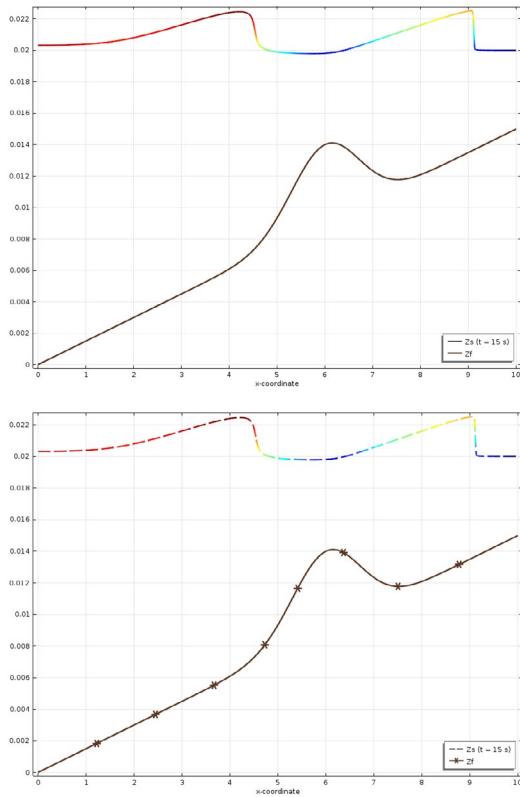


如果需要改变图例框的位置，可以在'绘图组'节点（例如，一维绘图组 1）展开'图例'标签，其位置可以设定为格线左边、右边和中间的顶部、中间和底部。

## 循环颜色

线颜色的'循环'设定会让线图在可供使用的颜色中循环（本例中只有蓝色和绿色）；这样就很容易分辨覆盖在同一个绘图组中的不同线图。

下图显示了这个绘图组中两个线图的不同颜色样式，以及标记组合后的效果。其中还使用了颜色表达式：



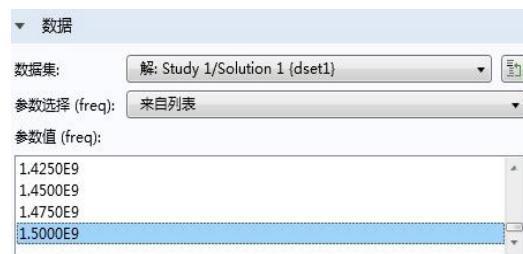
## 极坐标图

'极坐标图'是一维绘图的一种特殊类型。'极坐标绘图组'创建使用极坐标的图，半径为  $r$ ，角度为  $\Theta$ 。在电磁场和声学应用中，这是一种非常有用的方式，常用于扩音器的声发射分布，或者天线的范围等。极坐标图显示了从一个特殊参考点出发的基于距离和方向的量。

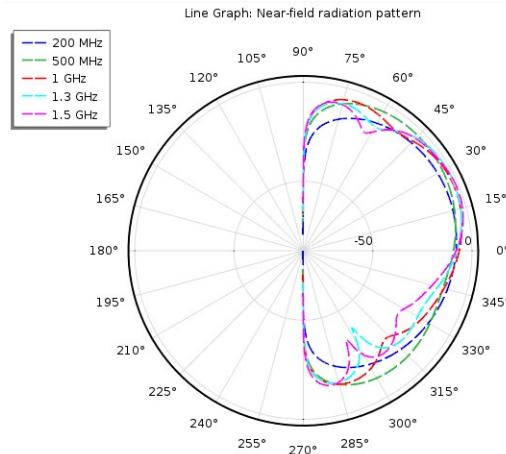
为了演示这个功能，我们将使用一个射频应用模型。如果您安装了 RF 模块，可以浏览到'文件' > '案例库' > 'RF Module' > 'Antennas'，并打开 conical antenna 模型。这个仿真研究了天线的阻抗，以及随着频率变化的围绕天线的电场辐射图案。

查看'极坐标绘图组 5'，其中的线图含表达式， $10^{\log10}(\text{emw.nPoav})$ ，该图使用了对数比例绘制近场辐射图案。

点击'极坐标绘图组 5'，将'参数选择(freq)'改为'来自列表'，在选择列表中，选择下列频率：2e8, 5e8, 10e8, 1.3e9, 1.5e9。使用滚动条并按住 CTRL 键来进行多选。



点击'绘图'。得到的极坐标图显示了我们选定的特定工作频率下的近场辐射图案，显示出辐射范围，以及它如何随频率发生变化。由于这个模型轴对称，因此我们只需要显示一半图案：



我们成功了！我们创建了三维、二维和一维绘图，涵盖了 COMSOL® 软件后处理的很多绘图选项。到此为止，希望您能满意我们对每种绘图类型概念的介绍。看起来内容有些多，不过也不要担心；我们将在探索其他技巧时再次回顾这些内容。现在让我们来研究一些其他后处理工具。

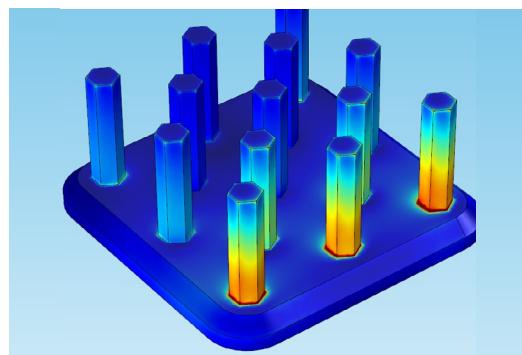
# 使用后处理解释结果

既然我们已经讲过了调整模型的最佳方式，接下来将简单介绍后处理如何能帮助设计或工程人员做出更好的设计决策。除了创建出清晰优质的图片，本指南中所介绍的技术还支持通过后处理来对仿真中所发生的物理场进行解释。

让我们暂时回到散热器模型。当我们绘制第一个表面图来显示散热器和通道内的温度时，散热器几乎全为白色——这非常合理，因为它当然是几何中最热的部分。但如果我不希望绘制它周围的温度又该怎么做？如果我们希望看一下散热器中不同区域的高温是如何相互关联的，又要如何操作？

为散热器创建包含以下内容的三维绘图组：

- 仅包含散热器边的线图（最简单的方法是清空选择列表，然后使用选择框工具进行添加）。
- 仅包含散热器、不包含周围通道的表面图；在表达式编辑框中输入 `nitf.tefluxMag` 来绘制能量通量大小，或者点击‘替换表达式>共轭传热(固体传热)>域通量’进行添加。

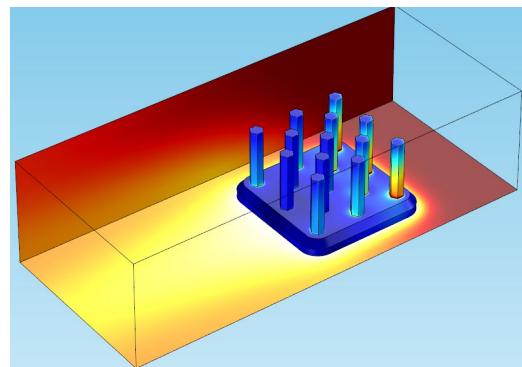


新绘图将显示之前绘图中没有的一些方面：散热器中最靠近通道入口处柱子上的能量传递（将上一幅图向前旋转）远快于通道出口附近的能量传递。事实上，某些柱子上并没有发生多少传热。设计时，也许可以从器件中移除这些部分以节省成本和材料。

再仔细观察一下，会发现柱子顶部也没有发生多少传热，是否可以降低柱子高度来节省材料？这类问题就可以借助后处理来回答。

如果我们希望重新显示整体几何，可以简单结合该绘图和之前的温度表面图来创建一个更有意思的视图：

- 我们刚刚创建的线图与表面图
- 通道温度表面图（仅包含后壁和底面）
- 空气域线图（已绘制通道的所有线）



## 参考

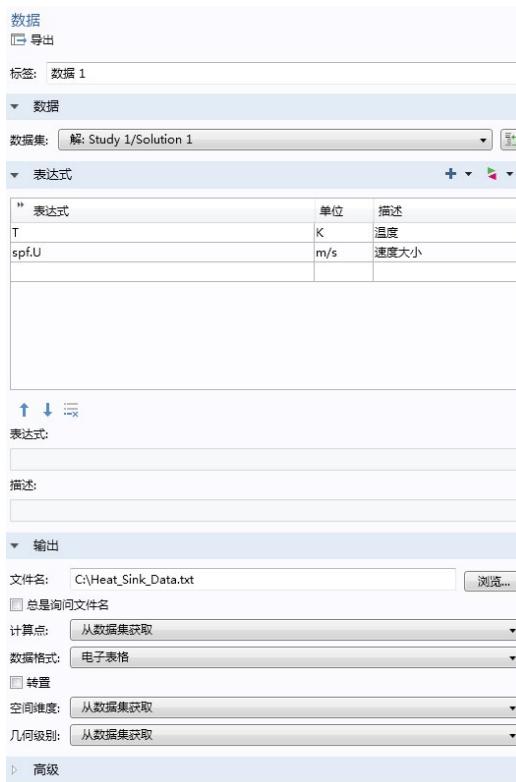
有关创建表面图和线图的说明，请返回阅读第 8 页绘图类型章节。

# 导出结果

最后，我们将以导出结果来结束手册中对 COMSOL® 软件功能的介绍。结果可以采用报告、绘图、表格、图形，甚至动画的形式导出。

## 数据、表格、与网格

右击任意模型中的‘导出’节点并选择‘数据’，本章我们将继续使用散热器模型。新的‘数据 1’节点设定窗口中包含：用于选择希望输出数据集的列表，用以增加表达式的表格（我们选择输出不同坐标处的散热器温度以及空气速度），以及诸如文件名和格式等的一些输出设定。



增加您希望添加的表达式，然后点击‘导出’。浏览您保存文本文件的文件夹打开文件，即可找到导出的数据。最好在文本编辑器中查看报告：

```
C:\Heat_Sink_Data.txt - Notepad++ [Administrator]
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ? X
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ? X
Heat_Sink.txt
1 % Model: heat_sink.mph
2 % Version: COMSOL 4.4.0.248
3 % Date: 2014-01-07 2014
4 % Dimension: 3
5 % Nodes: 127456
6 % Expressions: 2
7 % Description: Temperature, Velocity magnitude
8 % Length unit: 米
9 % x y z T (K) spf.U (m/s)
10 -0.009527 -0.007607 0.002133 378.527309 0
11 -0.009592 -0.007495 0.002204 378.521394 0
12 -0.009592 -0.007495 0.002 378.547969 0
13 -0.009555 -0.007627 0.002147 378.495868 6.661724e-5
14 -0.044995 -0.013932 0.001063 330.749242 0.00883
15 -0.044995 -0.012618 0.002505 330.507455 0.034109
16 -0.044908 -0.012226 0.001228 331.891974 0.020169
17 -0.044995 -0.011426 0.000156 328.514196 0.004709
18 -0.044995 -0.013851 0.000378 328.644463 0.022417
19 -0.044995 -0.013763 0.000716 329.660339 0.016689
20 -0.044995 -0.013765 0.004868 326.601016 0.02842
21 -0.044995 -0.013893 0.013888 315.945183 0.009824
22 -0.044995 -0.011719 0.012616 316.399799 0.042772
23 -0.044995 -0.011562 0.010495 316.233132 0.020962
24 -0.042918 -0.012336 0.01389 315.648323 0.018398
length: 8662705 line: Ln:37 Col:46 Sel:0|0 UNIX UTF-8 w/o BOM INS
```

## 提示

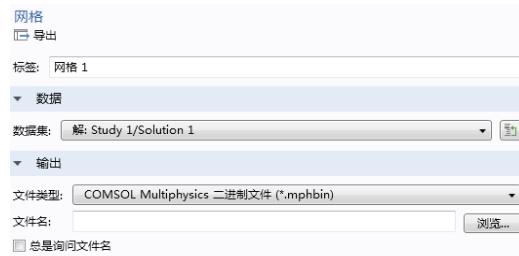
按照您需要的精度导出物理量。在此如此高的温度下，小数点后两位的精度已经足够，但在导出类似 MEMS 器件中微米级的位移数据时，小数点后六位的精度会更合适。在‘数据’设定窗口的‘高级’标签下，可以将精度级别设定为全精度。

您也可以从导出节点导出表格、网格、绘图和图像。

‘表格’可导出为多种文件类型，包括 Microsoft Excel® 电子表单：



网格可导出为一个新的 COMSOL Multiphysics® 软件二进制文件，以便导入至其他模型：



图像可以从绘图组中导出。在设定窗口中，您可以选择希望导出的绘图显示的视图，以及在‘图形’窗口布局中包括的‘标签’（比如颜色图例、轴方向，以及标题）：



如果您仅希望导出‘图形’窗口中所示的精确图像，最简单的办法就是点击‘图形’窗口工具条中的‘截屏’按钮。在截屏窗口中，您可以选择希望导出的内容，并设定‘尺寸’和‘文件类型’：



将‘尺寸’设定为‘当前’，导出屏幕所示的精确图像。从图形窗口中所导出图像的进行设定可以在主菜单下的‘文件’ > ‘首选项’中进行调整。在‘图形和绘图窗口’部分，您可以更改图形生成的可视化选项。



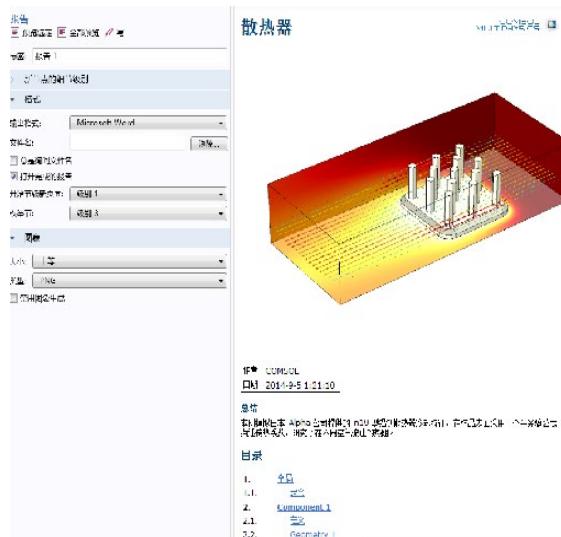
## 报告

导出报告是一个很好地将仿真中所有信息编译在一起的方法，它使您可以更加容易地将模型交给您的同事或其他人使用。

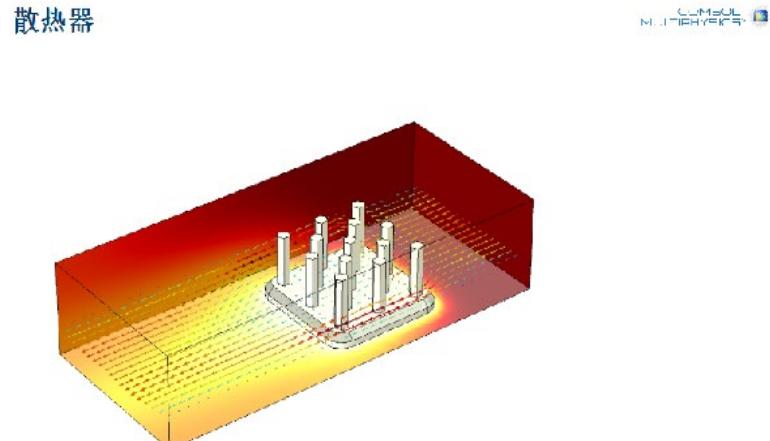
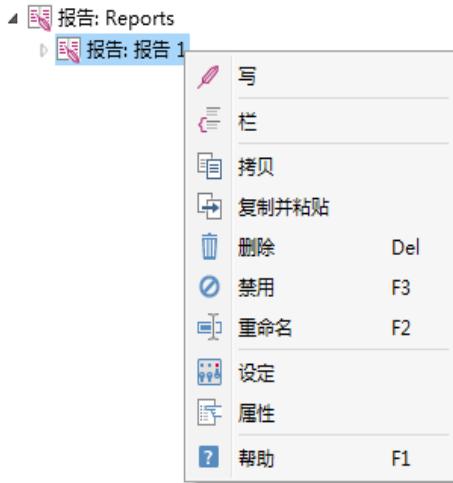
右击'报告'节点，您将看到一些选项，包括创建简报、中级报告、完整报告，以及一个创建定制报告的选项。

- '完整报告'包含所有与模型相关的信息，包括物理场接口和底层方程的细节。这种报告适用于分析和解决问题。
- '中级报告'包含模型中用到的物理场设定和变量，以及与研究、结果和绘图相关的信息。
- '简报'给出模型的概述，包括绘图和结果，但是不包括变量或物理场的细节。
- '定制报告'支持您选择报告中将包含的内容。

导出选项允许您生成 HTML 或 Microsoft® Word 格式的报告。点击设定顶部的'全部预览'按钮，您可以在'图形'窗口循环看到几何、网格、解，以及您创建的绘图。循环完成后，它将向您显示报告文档的预览。



点击'写'来创建报告。



作者	COMSOL
日期	2014-9-5 1:21:10

从上面显示的下拉列表中选择'栏'来创建一个节点，您可以在此添加内容到报告中。右击新增的'栏'节点将会显示添加几何、网格、求解器、研究，以及结果等信息的选项。

# 操作提示与技巧

## 快捷方式

除了提到的这些绘图技巧，我们还要再讲一下一些非常有用的快捷方式。您在'图形'窗口顶部可以找到这些快捷方式。

除了改变缩放和视图方向的按钮，您还可以用这个工具条上的'选项控制选择'、'透明度'，以及'布景照明'。我们已经用过其中的一些快捷方式，例如'缩放至视窗大小'。下面将简要介绍其他快捷方式：



- 缩放框：允许您通过点击和拖放鼠标来创建矩形框，高亮区域的几何将被放大。
- 缩放选定：所选定区域的几何组件，将被缩放。
- 返回缺省三维视图：将模型定向到缺省的三维视图。
- xy、yz 和 zx 视图：将视图改到 xy、yz 或者 zx 平面。
- 选择和隐藏工具：与'视图'节点中可使用的'隐藏几何实体'特征类似，这些选择工具可以用来在'组件'的子节点中选择或隐藏实体；它们所创建的'隐藏几何对象'节点将不会应用于'结果'节点。
- 布景灯：完全开启或关闭布景灯。

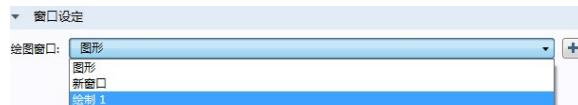
### 提示

可以通过右击节点，选择重命名，并输入所希望的标题，手动重命名节点。这是一个组织数据集和绘图组的好方法，尤其是当拥有很多包含选择的解或同一个绘图组中有多个图的情况下。

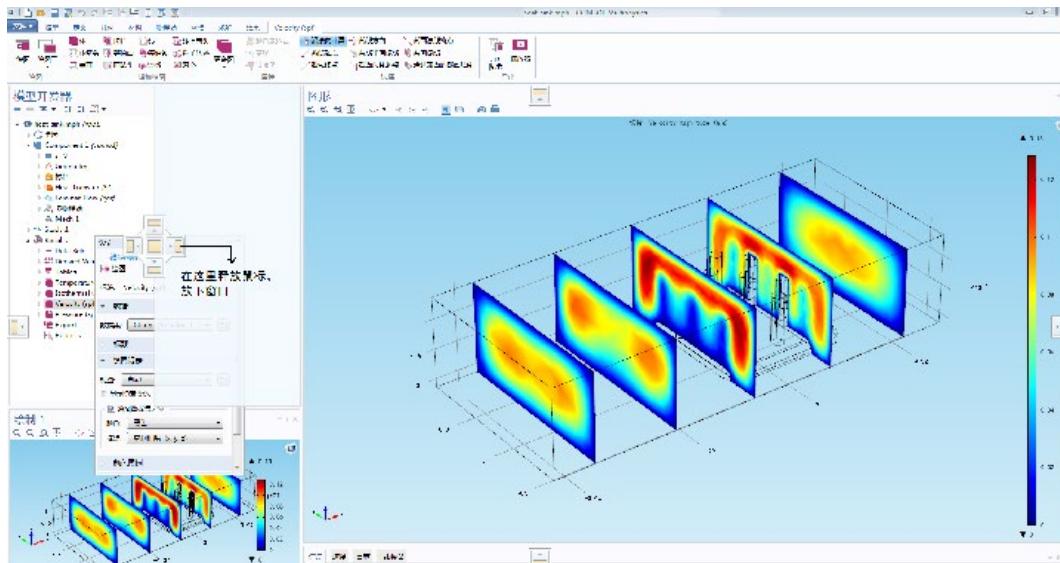
- 透明度：将模型几何变得透明。
- 截屏：打开对话框，将'图形'窗口的当前视图导出为一个图像。
- 打印：打开一个对话框，打印当前视图。

## 重排 COMSOL Desktop® 环境

COMSOL Desktop® 环境相当灵活，很容易重新排列。可以在绘图组节点的'窗口设定'标签中实现多个窗口中绘图，还可以使用这些设置重命名窗口。



窗口可以移动到桌面的不同区域，通过拖放方法来重新组织，从而便于同时查看和比较多个绘图。

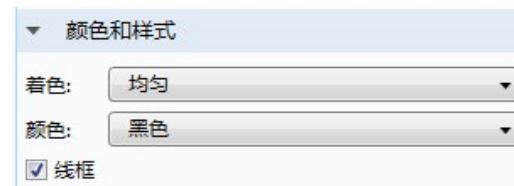


将出现提示新位置的米黄色和白色窗口（阴影部分），在其上释放鼠标来放下窗口。

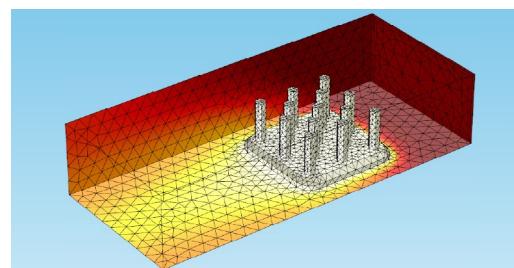
## 在表面图中显示网格

显示模型中的网格，这有助于您研究结果时了解某个区域的解有多精细，例如，查看梯度很大的区域是否需要进一步细化网格来得到更高精度的解。

让我们回到最初在散热器模型所绘制的第一个温度表面图，在绘图组中增加第二个‘表面图’，将‘颜色’设定为‘均匀的黑色’。此时，不需要关心使用什么表达式，因为我们只需要绘制单元，而不是结果。



勾选‘颜色和样式’标签下的‘线框’复选框，然后点击‘绘图’。



现在我们可以看到在散热器和柱子周围的网格最密，通道壁上的网格较稀疏。如果禁用温度表面图，就只会看到线框。与其他绘图类型相似，线框表面图可以绘制在不同的数据集上，并且可以根据您的喜好调整颜色和样式。

## 细化网格

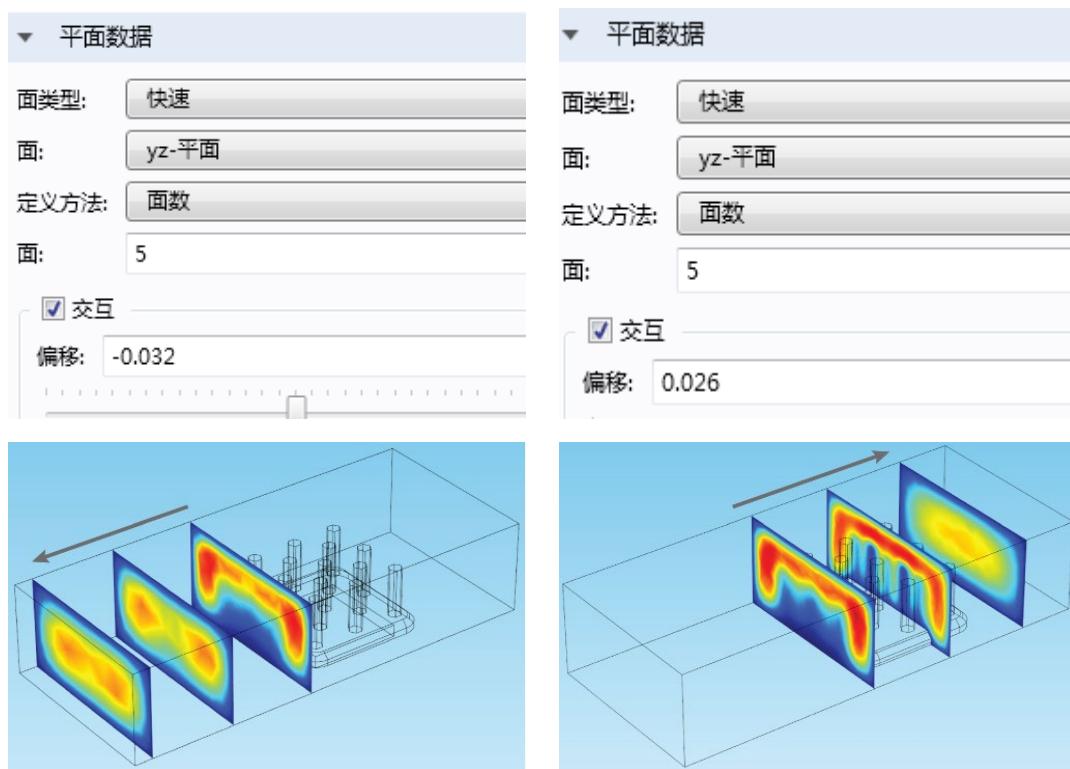
对于需要在指定区域细化网格从而得到更高精度结果的情况，COMSOL® 软件中的自适应网格细化功能可以帮助实现这种细化。

## 滑动与交互式定位

对于一些绘图类型，使用鼠标而非坐标或设定来定位结果会更有帮助。在一些情况下，包含交互式定位的选项。

打开之前创建的显示散热器通道中空气流速的切片图，在'平面数据'标签下，勾选'交互'复选框。这个特征使您可以通过拖动滑动条来移动绘图中的切片位置（'偏移'编辑框将显示距离）。

在'图形'窗口中，当您移动滑动条时切片随之移动，当偏移距离足够大时，甚至会从几何的可视边界中消失。



# 结束语

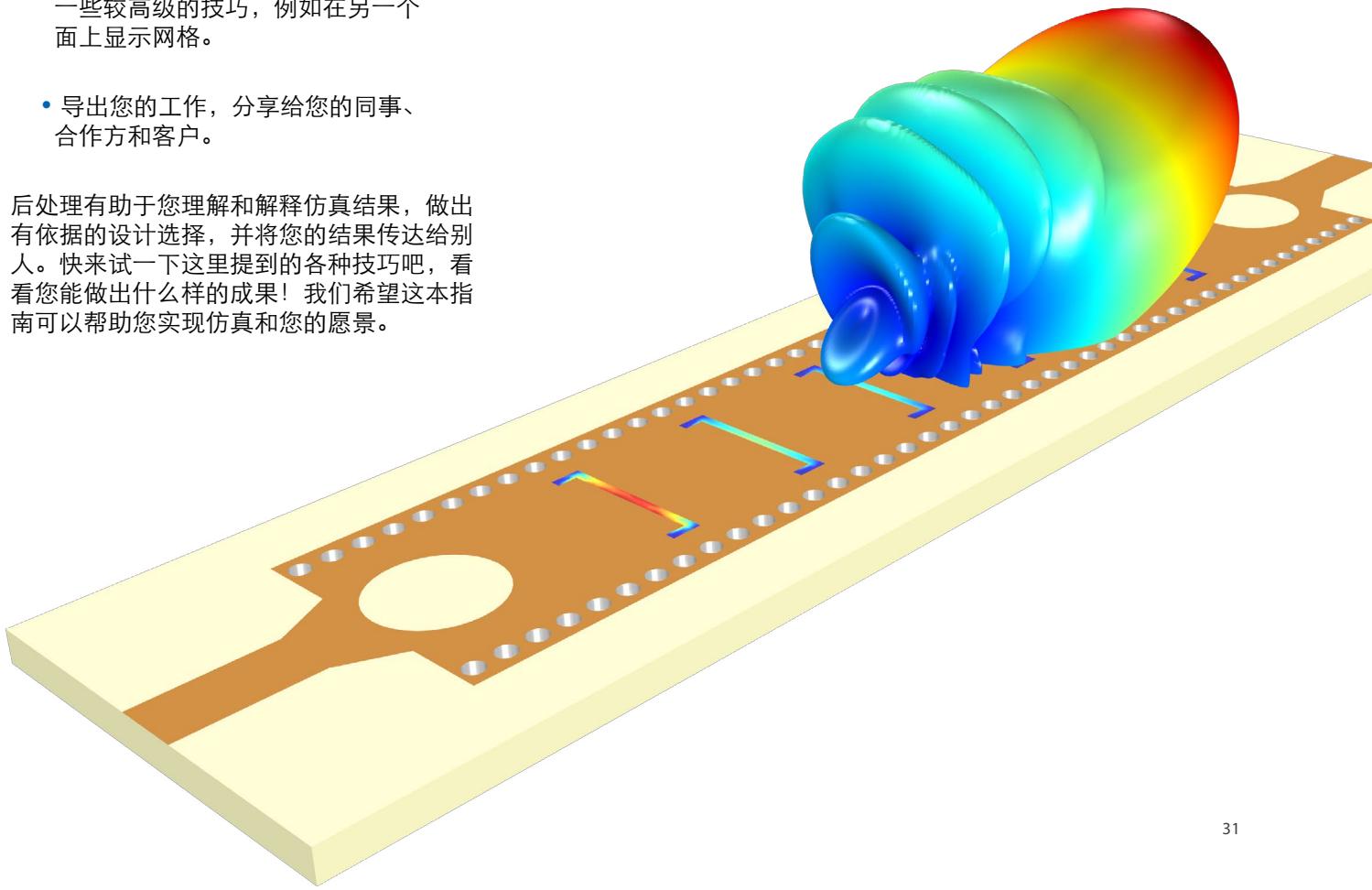
我们已经涵盖了您需要了解的一些最常用的基本后处理操作，以及一些较高级的用于对结果进行润色的技巧。简单总结一下：

- 从'数据集'和'计算'开始，理解您器件中发生的物理现象；这些将非常有助于计算模型中的最大值、最小值，以及指定位置的值。您还可以使用'镜像'和'旋转数据集'来显示整个三维对象（如果您只模拟了其中一部分）。
- 您不妨思考一下如何才能更好地展示您的工作内容，将把结果展示给谁看，在哪里展示，进而选择一个最适合您所希望显示的物理场及所面向听众的绘图类型。
- 然后开始绘图！我们已经演示了如何使用表面、箭头、线、切片、等值线、流线和等值面等图像，以及一些较高级的技巧，例如在另一个面上显示网格。
- 导出您的工作，分享给您的同事、合作方和客户。

后处理有助于您理解和解释仿真结果，做出有依据的设计选择，并将您的结果传达给别人。快来试一下这里提到的各种技巧吧，看看您能做出什么样的成果！我们希望这本指南可以帮助您实现仿真和您的愿景。

## 基片集成波导 (SIW)

使用 RF 模块设计的用于从一个基片集成波导 (SIW) 顶面上的狭缝阵列漏波的模型。SIW 用于天线，可以通过改变工作频率将漏波导向预先确定的方向。结果显示了远场辐射图案。



## 换热器

模拟壳内充满空气，内管中通水的壳管换热器，仿真结果给出了容器内的流速、温度分布，以及容器内的压力。

