

MEMS 模块

简介

MEMS 模块简介

© 1998–2018 COMSOL 版权所有

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

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

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

版本：COMSOL 5.5

联系信息

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

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

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

文档编号：CM020904

目录

- MEMS 模块 5
- MEMS 器件：物理场和应用 6
 - MEMS 模块物理场接口指南 11
 - 基于空间维度和预设研究类型的物理场接口指南 16
- 教程示例：电容式压力传感器建模..... 20

MEMS 模块

工程师和科研人员可以使用“MEMS 模块”来理解、预测和设计微系统。在设计过程中使用仿真工具可以增强理解、减少原型设计，最终花费较低的开发成本生产出更优质的产品。“MEMS 模块”可以帮助用户快速、准确地预测 MEMS 器件的结构、电和热性能。借助 COMSOL Multiphysics 软件内置的多物理场功能，您可以轻松地耦合了多种物理效应的器件进行建模，该模块尤其适合解决 MEMS 设计中遇到的一系列问题。

“MEMS 模块”可用于在二维和三维下模拟器件的静态和动态性能，其中结合了针对有源和无源器件的基于电路的建模功能。在频域下，提供强大的工具用来模拟由交流和直流信号或力耦合驱动的器件。其中预定义的物理场接口统称为 MEMS 物理场接口，可以分析在 MEMS 传感器和执行器中发生的各种物理现象。MEMS 物理场接口可用于模拟结构力学、静电学、电流、压电现象、压阻效应、薄膜流体流动、传热和电路。这些物理场接口还可以任意耦合，以解决多物理场问题，MEMS 物理场接口还包括许多预定义的耦合特征：电机学（将静电力与结构力学相结合）、焦耳热、焦耳热和热膨胀以及流 - 固耦合（将流体流动与结构力学相结合）。

对于每个 MEMS 物理场接口，基本物理原理均以偏微分方程的形式来表达，并与相应的初始条件和边界条件相结合。COMSOL 的设计通过向用户提供由每个特征求解的方程，并提供对基础方程组的完全访问权限，来强调物理场概念。系统也具有极大的灵活性，可供用户在方程组中添加用户定义的方程和表达式。例如，要模拟具有温度相关弹性属性的结构中的焦耳热，只需输入随温度变化的弹性常数 - 无需编写脚本或代码。在 COMSOL 编译方程时，由用户定义的这些表达式生成的复杂耦合将自动包含在方程组中。然后，系统会使用有限元法和一系列工业级求解器来求解方程。在得到解之后，您可以使用多种后处理工具来分析数据，系统还会自动生成预定义的绘图，以显示器件响应。COMSOL 提供极强的灵活性供您评估各种物理量并将其可视化，包括预定义的物理量，例如温度、电场或应力张量（通过易于使用的菜单提供），以及用户定义的任意表达式。

要为 MEMS 器件建模，首先需要在软件中定义几何（或从 CAD 文件或系统导入）。然后选择合适的材料，并添加适当的 MEMS 物理场接口。可以在物理场接口中设置初始条件和边界条件。接着，定义网格并选择求解器。最后，使用各种后处理工具将结果可视化。所有这些步骤均在 COMSOL Desktop 图形用户界面中执行。

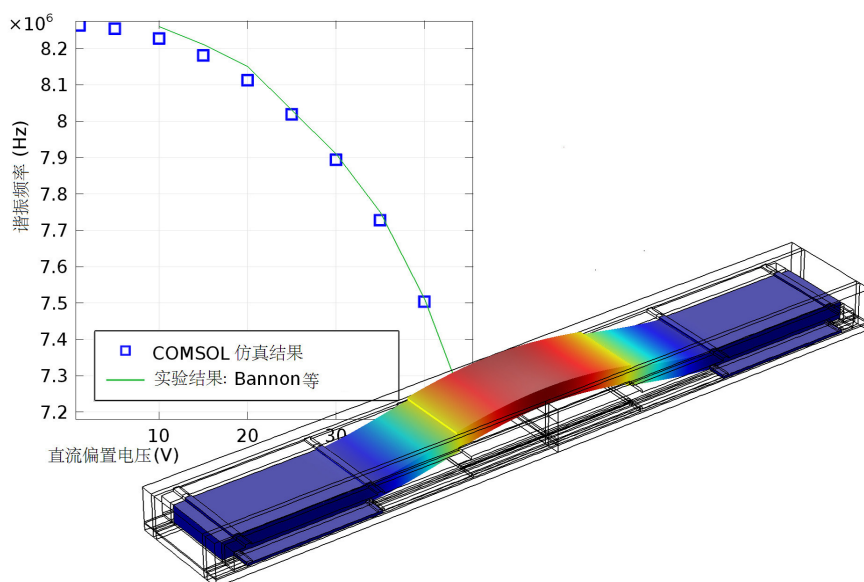
MEMS 器件：物理场和应用

不断减小的 MEMS 器件尺寸对控制其运行的物理过程有着重要的影响。MEMS 物理场接口可用于模拟微尺度领域的重要物理效应。

一般来说，随着器件长度尺度 (L) 的减小，物理效应与 L 的比例可以确定它的相对重要性。产生实体固定加速度所需的惯性力与体积成正比，表示为 L^3 。与这种惯性力相比，其他力的比例对 MEMS 器件有重要的影响。例如，某个体的有效弹簧常数按比例表示为 L^1 。由于系统的尺寸缩小，弹簧刚度减小的速度比系统质量慢得多，从而导致器件越小，谐振频率越高（谐振频率按比例表示为 L^{-1} ）。这意味着，微机械系统通常比宏观系统有着更高的工作频率和更快的响应时间。

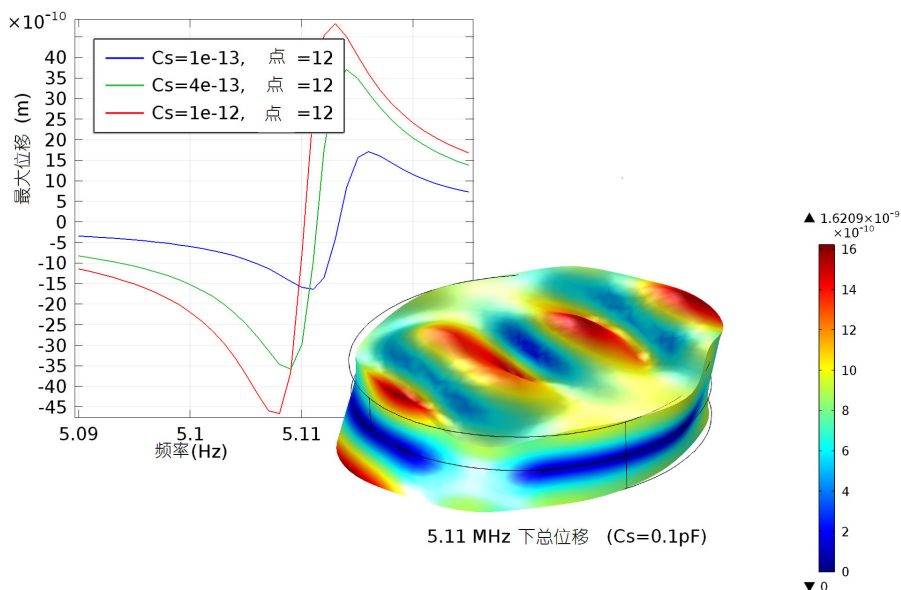
当器件尺寸减小时，静电力会按比例变化（例如，具有固定外加电压的平行板之间的力按比例表示为 L^0 ）。此外，静电执行器不消耗直流功率，因此可以使用与标准半导体铸造厂一致的工艺进行制造。鉴于此，许多 MEMS 器件都采用了静电驱动。

下图显示静电驱动的 MEMS 谐振器的振型，该谐振器在外加直流偏压作用下工作。图形表明，谐振频率随着外加电势的增大而降低；这是耦合机电系统的软化造成的。即使对于简单的挠曲型，小尺寸的器件也会产生 MHz 谐振频率。不仅如此，电磁力的成比例变化还能产生在宏观尺度上无法实现的有效电容驱动。

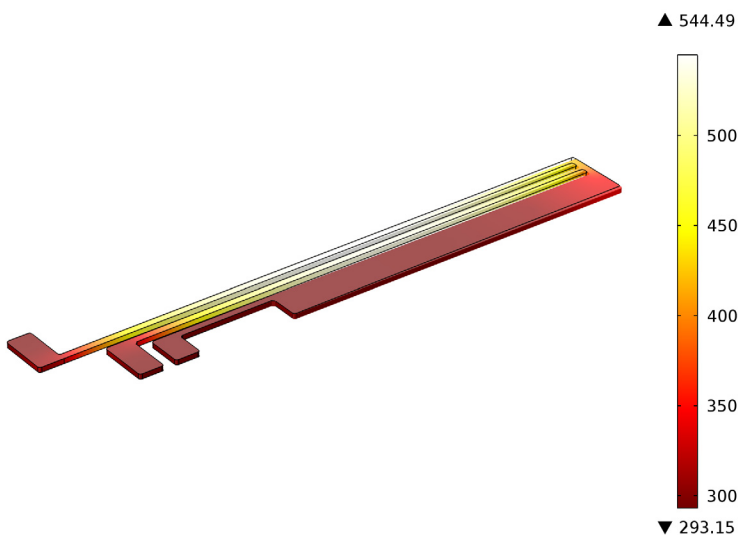


随着器件尺寸的减小，压电力也呈比例变化（由恒定外加电压产生的力按比例表示为 L^1 ）。并且压电传感器和执行器主要表现为线性，因此在工作时不消耗直流功率。压电材料在融入标准半导体工艺时更为困难，但在商业市场上，压电应用已经取得了重大进展（例如 FBAR 滤波器）。石英频率基准源可以认为是目前产量最高的 MEMS 元件，每年制造的设备超过 10 亿台。尽管传统上并不认为它属于 MEMS 范畴（石英行业早在这一术语提出之前就存在了），但许多石英设备的尺寸都在毫米到亚毫米之间，并已通过平版印刷的方式进行了定义。此外，一些石英产品现已正式冠以 MEMS 器件的名称。

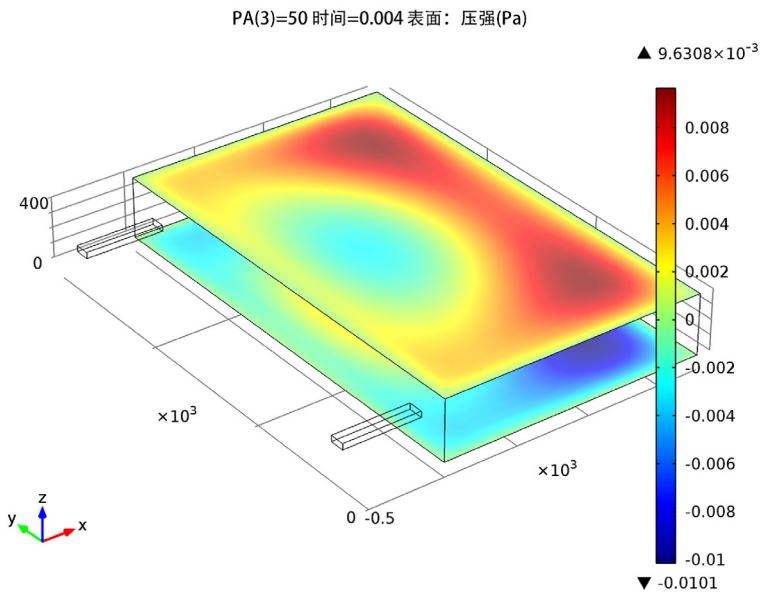
下图显示厚度剪切石英振荡器的力学响应，另一张图显示了串联电容 (C_s) 对频率响应的影响。串联电容常用于调整或牵引石英振荡器的谐振。



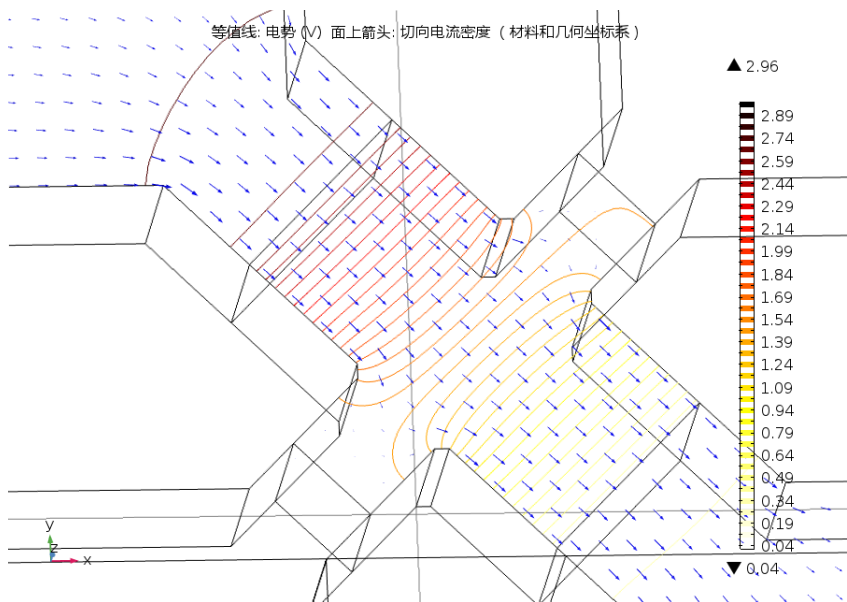
假设力由固定的温度变化产生，则热力按比例表示为 L^2 。这一比例与惯性力相比仍具有优势，并且热时间尺度也呈比例变化（为 L^2 ），从而使热执行器在微尺度下运行更快（尽管热执行器通常比电容或压电执行器速度慢）。热执行器也很容易与半导体工艺相集成，然而它们消耗的功率通常较大，因此在商业应用上有所限制。由于沉积薄膜中的热应力在广泛的应用中非常关键，热效应在许多商业 MEMS 技术制造中都起着重要的作用。下图显示一个发生位移的焦耳热执行器内的温度。



射流 MEMS 器件或微流体设备的发展意味着 MEMS 领域发挥着日益重要的作用。COMSOL 专门针对这些应用提供了单独的“微流体模块”。尽管如此，“MEMS 模块”也包含重要的微流体功能，用于模拟 MEMS 结构与流体的相互作用。一个极具吸引力的领域便是薄膜阻尼。阻尼力按比例表示为 L^1 ，这通常是 MEMS 器件的重要因素，往往需要对产品进行真空包装。下图显示一个简单加速度计表面的压力。此压力是加速度计与包装（图中未显示包装）之间稀薄气体薄层的压缩造成的。



上述内容集中讨论了用于驱动执行器的力，然而，这种比例关系在传感器的工作中也起着重要的作用。存在与设备尺寸无关的固定应变比例（为 L^0 ）时，压阻式传感器通常会产生与应力成正比的输出。压阻效应是指材料在外加应力作用下引起的电导率的变化。鉴于小型压敏电阻器能与标准半导体工艺轻松集成，加上传感器本身具备的合理线性响应，使得这项技术在压力传感器行业起着举足轻重的作用。下图显示在压力传感器挠曲作用下的压敏电阻器中的电流分布和感应电压。



MEMS 模块物理场接口指南

MEMS 物理场接口用于模拟 MEMS 器件。每个物理场接口都以偏微分或常微分方程组的形式，并结合适当的边界和初始条件来表示相关的物理现象。添加到物理场接口的每个特征都表示基本方程组中的一个项或条件。这些特征通常与模型中的几何实体关联，例如域、边界、边（对于三维组件）或点。图 1 使用“微镜”模型（位于“MEMS 模块”案例库）显示了“模型开发器”和所选“线弹性材料 1”特征节点的“设置”窗口。此节点添加了结构力学方程，用于对选定的域进行仿真分析。“线弹性材料”栏中的多个设置表明，杨氏模量、泊松比和密度都继承自该域中指定的材料属性。这些材料属性可以设为模型中其他因变量的函数，例如温度。模型树中还显示了“自由”和“固定”边界条件。默认情况下，“自由”边界条件会应用到模型中的所有表面，支持表面进行自由运动。“固定”边界条件用于约束固定表面，例如将其附着到晶片手柄。

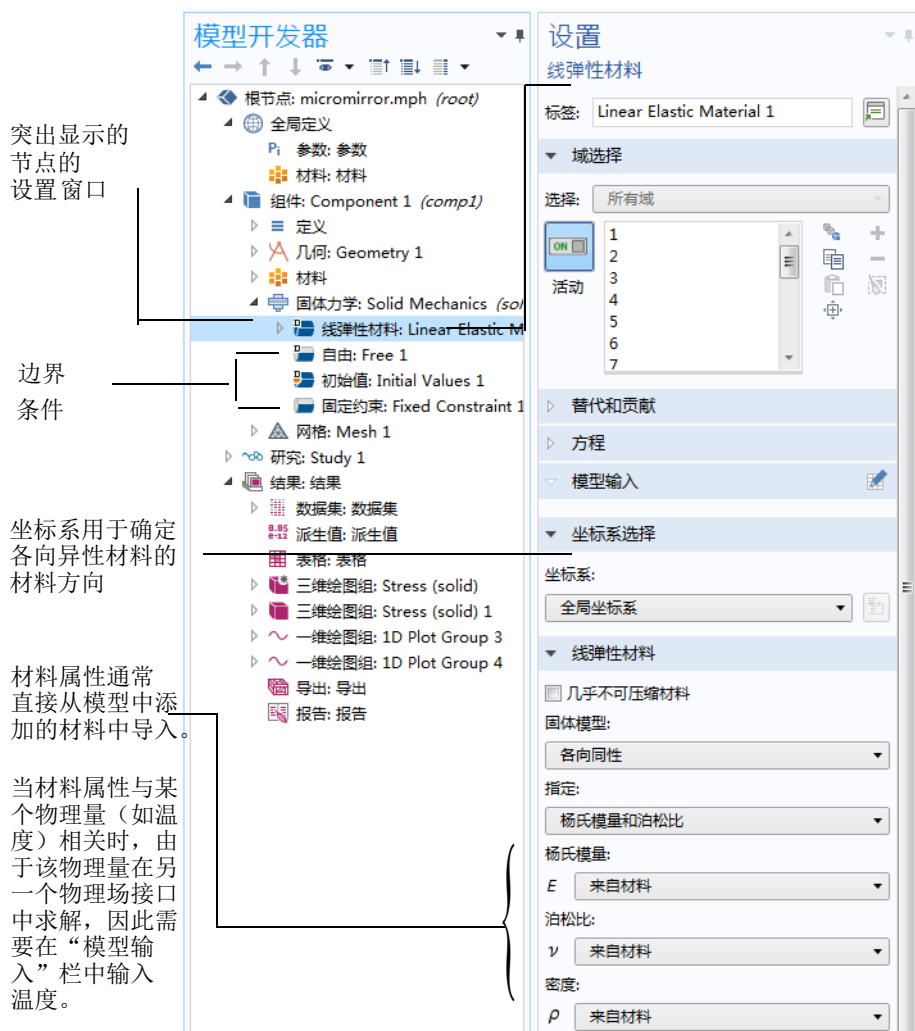


图1: “模型开发器”窗口 (左) 和所选特征节点“线性弹性材料1”的“设置”窗口 (右)。“设置”窗口中的“方程”栏显示模型方程。由特征添加到方程组的项带有虚线下划线。请注意, 求解器设置中已禁用几何非线性, 从而使方程形式变得更简单。

“MEMS 模块”提供的许多物理场接口可用于模拟微系统设计中遇到的各种物理现象。在开始创建新模型时, 可以从“模型向导”中选择这些物理场接口。图 2 显示的“模型向导”列出了“MEMS 模块”包含的物理场接口。由于 MEMS 是一个融合了多种学科的行业, 这些物理场接口遍布在 COMSOL 支持的物理场类型的各个领域, 并相应地出现在“模型向导”的多个分支中。另请

参见[基于空间维度和预设研究类型的物理场接口指南](#)。下面是“MEMS 模块”中每个物理场接口的简要概述。

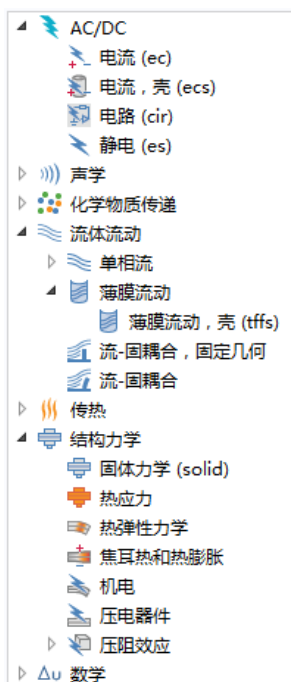


图2：“模型向导”中显示的“MEMS 模块”物理场接口。请注意，这些接口适用于三维组件。

静电

“静电”接口 () 位于“模型向导”的 AC/DC 分支下，可以在给出域中的电荷分布和边界上的外加电压的情况下求解电势。该接口用于为静态或准静态条件下的静电设备建模，也就是说，当频率足够低时，可以忽略波传播效应。此物理场接口的典型应用是计算无偏压 MEMS 器件的低频电容。

电流

“电流”接口 () 位于“模型向导”的 AC/DC 分支下，用于为传导和电容介质中的直流、交流和瞬态电流的流动进行建模。该物理场接口求解电流守恒方程来得到电势。可以用来计算互连层中的电流分布。

电路

“电路”接口 () 位于“模型向导”的 AC/DC 分支下，可通过一系列方程为连接或未连接到分布式场模型的电路建模。用于求解与电路元件关联的电压、

电流及电荷。电路模型可以包含电阻器、电容器和电感器等无源元件，也可以包含二极管和晶体管等有源元件。电路可以从现有的 SPICE 网表中导入。此物理场接口的典型应用是评估串联电容对石英晶体振荡器的影响。

机电

“机电”这一预定义多物理场接口 () 位于“模型向导”的“结构力学”分支下，将“静电”和“固体力学”物理场接口与“机电力”多物理场耦合以及“动网格”多物理场定义进行组合，以结合静电方程来求解结构方程。电力会添加到模型的结构中，您也可以根据需要包含各向同性电致伸缩。这个多物理场接口可用于为静电驱动的 MEMS 器件建模，也能模拟基于电容的传感器（可以检测结构变形）。

机电，边界元

“机电，边界元”这一预定义多物理场接口 () 位于“模型向导”的“结构力学”分支下，将“静电，边界元”和“固体力学”物理场接口与“机电力”多物理场耦合进行组合。该接口与“机电”接口相同，只是采用边界元法求解问题的静电部分。使用此方法时无需“动网格”。

流-固耦合

“流-固耦合 (FSI)”接口 () 位于“模型向导”的“流体流动”分支下，将流体流动与固体力学组合到一起，以捕获流体与固体结构之间的相互作用。“固体力学”接口和“单相流”接口分别用于模拟固体和流体。流动可以是层流，也可以是湍流（湍流需要“CFD 模块”，该模块还支持“两相流”和“三相流”接口与固体力学进行耦合）。FSI 耦合发生在流体与固体之间的边界上。“流-固耦合”接口使用任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 法，将使用欧拉描述和空间坐标系表示的流体流动和使用拉格朗日描述和材料（参考）坐标系表示的固体力学组合到一起。

焦耳热和热膨胀

“焦耳热和热膨胀”接口 () 将热、电和结构多物理场效应相结合。预定义的耦合可以添加电场中的电磁损耗作为热源。从“模型向导”中选择此选项后，可以将“固体力学” ()、“电流” () 及“固体传热” () 接口添加到模型中，并包含与焦耳热的适当耦合（位于“模型开发器”的“多物理场”分支下 ()）。这一多物理场接口描述结构中的电流传导、由结构中的欧姆损耗引起的后续电热以及温度场引起的热应力。典型应用包括热执行器。

压电器件

“压电器件”接口 () 位于“模型向导”的“结构力学”分支下，用于模型中包含压电材料的情况。压电耦合可以指定为应力-电荷型或应变-电荷型。从“模型向导”中选择此选项后，可以将“固体力学”和“静电”接口添加

到模型中。默认情况下，压电材料会添加到“固体力学”接口的所有域，并且“电荷守恒，压电”节点会添加到“静电”接口的相同域。这两个节点通过“压电效应”多物理场耦合特征（位于“模型开发器”的“多物理场”分支下）进行耦合。

压阻效应

“压阻效应”接口 () 位于“模型向导”的“结构力学”分支下，将“固体力学”接口（或“壳”接口）与“电流”接口（或“电流，单层壳”接口）相结合，并添加压阻材料的本构关系。压阻材料可以同结构和导电材料一起建模。应用领域包括压阻式压力传感器建模。

固体力学

“固体力学”接口 () 定义用于应力分析和一般线性与非线性固体力学的物理量及特征，从而求解位移。“线弹性材料”节点是默认的材料模型。此外，弹性材料模型还能扩展为包含热膨胀、粘弹性、阻尼，以及预应力和预应变特征。模块中弹性材料的描述包括各向同性、正交各向异性和完全各向异性材料。该接口提供许多预设研究类型 - 请参见[基于空间维度和预设研究类型的物理场接口指南](#)中的列表。

薄膜流动

“薄膜流动” () 接口用于为表面薄层中液体或气体的流动建模。这些物理场接口通过使用表面上定义的方程，来计算狭窄平面结构的平均速度和压力。在 MEMS 应用中，这些物理场接口通常用于薄膜阻尼建模。

热应力

“热应力”接口 () 将热和结构多物理场效应相结合。预定义的耦合可以将传热问题导致的热膨胀添加到结构中。从“模型向导”中选择此选项后，可以将“固体力学” () 和“固体传热” () 接口添加到模型中，并包含一系列特征，用于将固体中的结构扩展与温度分布相耦合（这些特征位于“模型开发器”的“多物理场”分支下 ()）。典型应用是模拟热梯度造成的设备变形。

热弹性力学

“热弹性力学”这一预定义多物理场接口 () 将“固体力学”和“固体传热”物理场接口与“热膨胀”和“温度耦合”多物理场耦合进行组合，求解结构位移和温度偏差，以及热弹性耦合引起的传热。热弹性力学对具有高品质因子的 MEMS 谐振器的阻尼起着非常重要的作用。

基于空间维度和预设研究类型的物理场接口指南

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

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
AC/DC				
电流 ¹		ec	所有维度	稳态；稳态源扫描；频域；瞬态；小信号分析，频域
电流，多层壳		ecs	三维	稳态
电路		cir	非空间相关	稳态；频域；瞬态；小信号分析，频域
静电 ¹		es	所有维度	稳态；瞬态；稳态源扫描；特征频域；频域；小信号分析，频域
流体流动				
流 - 固耦合 ²		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；稳态，单向耦合；瞬态；瞬态，单向耦合
流 - 固耦合，固定几何 ²		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
流体 - 壳相互作用 ²		—	三维、二维轴对称	稳态；稳态，单向耦合；瞬态；瞬态，单向耦合
流体 - 壳相互作用，固定几何 ²		—	三维、二维轴对称	稳态；瞬态
流体 - 膜相互作用 ²		—	三维、二维轴对称	稳态；稳态，单向耦合；瞬态；瞬态，单向耦合
流体 - 膜相互作用，固定几何 ²		—	三维、二维轴对称	稳态；瞬态

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
 单相流				
层流 ¹		spf	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
 薄膜流动				
薄膜流动，壳		tffs	三维	稳态；瞬态；频域；特征频率
薄膜流动，域		tff	二维	稳态；瞬态；频域；特征频率
薄膜流动，边		tffs	二维和二维轴对称	稳态；瞬态；频域；特征频率
 电磁热				
焦耳热 ^{1,2}		—	所有维度	稳态；瞬态；小信号分析；频域
 结构力学				
固体力学 ¹		solid	三维、二维、二维轴对称	稳态；特征频率；特征频率，预应力；模式分析；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；响应谱，线性屈曲；螺栓预紧力
热应力 ²		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
焦耳热和热膨胀 ²		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；瞬态
热弹性力学		—	三维、二维、二维轴对称	特征频率；频域；瞬态

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
机电		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；特征频率，预应力；瞬态；频域，预应力
机电，边界元		—	三维、二维	稳态；特征频率，预应力；瞬态；频域，预应力
压电器件 ²		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；特征频率；特征频率，预应力；瞬态；瞬态，模态；瞬态，预应力，模态；频域；频域，模态；频域，预应力；频域，预应力，模态；模态降阶模型；小信号分析；线性屈曲
磁致伸缩		—	三维、二维、二维轴对称	稳态；特征频率；瞬态；频域；小信号分析，频域；特征频率，预应力；频域，预应力
 压阻效应				
压阻，域电流		—	三维	稳态；特征频率；瞬态；瞬态，模态；频域；频域，模态；小信号分析，频域；特征频率，预应力；频域，预应力；模态降阶模型
压阻，壳 ³		—	三维	稳态；瞬态；瞬态，模态；频域；频域，模态；小信号分析，频域；特征频率，预应力；频域，预应力；模态降阶模型

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的研究类型
压阻，边界电流		—	三维	稳态；特征频率；瞬态；瞬态，模态；频域；频域，模态；小信号分析，频域；特征频率，预应力；频域，预应力；模态降阶模型
¹ 此物理场接口随核心 COMSOL 软件包一起提供，并添加了针对此模块的功能。 ² 此物理场接口是预定义的多物理场耦合，可以自动添加所有需要的物理场接口及耦合特征。 ³ 需要添加 “结构力学模块”。				

教程示例：电容式压力传感器建模

本教程分析一个假想的绝对压力传感器，这是在 V. Kaajakari 编著的 *Practical MEMS* 一书中所采用的示例 (V. Kaajakari, *Practical MEMS*, Small Gear Publishing, Las Vegas, pp. 207–209, 2009)。最初，我们在理想的工作条件下评估设备的灵敏度。然后，从设备对压力的敏感性以及对温度的诱发敏感性两方面分析封装感应力度的影响。

该设备的几何结构如图 3 所示。压力传感器是在 70°C 下粘合到金属板的硅芯片的一部分。COMSOL 模型可以利用几何的对称性，仅对该设备的四分之一进行建模。

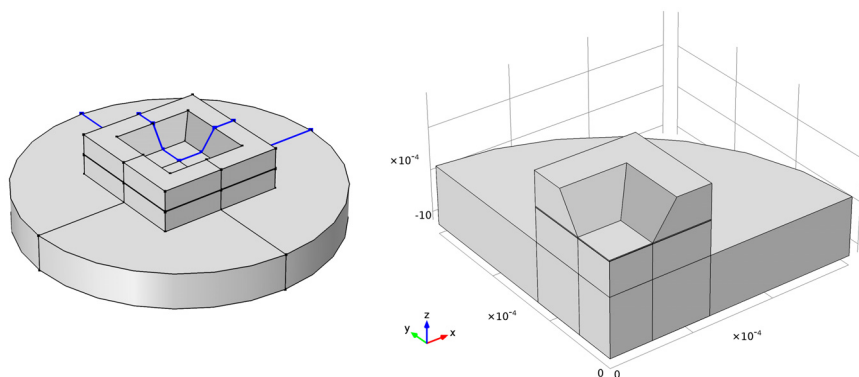


图 3：模型几何结构。左：对称的设备几何，结构的四分之一用蓝色边突出显示，从而显示对称平面。右：在 COMSOL 中，只需对突出显示的四分之一部分进行建模，然后对横截面壁使用对称边界条件。

图 4 显示设备功能部分的详细二维截面。薄膜上施加了 1 V 的固定电势，并通过一个高真空密封腔与地面隔开。腔体两侧是绝缘的，以防止薄膜与地面连接（为简化起见，COMSOL Multiphysics 模型中没有对绝缘层进行显式建模 - 这种近似方法对研究结果几乎没有影响）。

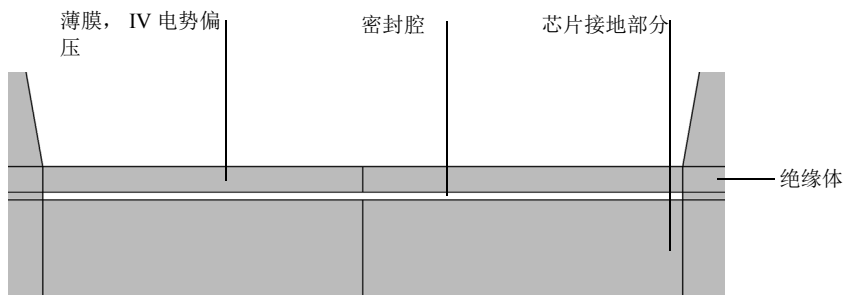


图4：设备横截面，显示了电容器。图中放大了垂直轴以突出间隙。

环境气体对薄膜施加的压力使它产生挠曲。此时，整个薄膜的间隙厚度发生改变，导致其对地电容也随之变化。接下来，电容由接口电路进行监控，例如 *Practical MEMS* 一书的案例研究中讨论的开关电容放大电路。

由于硅芯片与金属板之间的热导率不匹配，以及粘合过程中的升温（假设为 70°C ，与 20°C 的工作温度形成对比），导致结构中产生热应力。这些应力在外加压力的作用下会改变薄膜的变形，从而改变传感器的响应。此外，由于应力与温度相关，还会在设备输出中引入不必要的温度依存性。

最初，我们在没有封装应力的情况下对传感器进行分析。然后再考虑封装应力的影响。首先，在考虑额外封装应力的情况下对固定温度下的设备响应进行评估。最后，对固定外加压力作用下的设备响应的温度依存性进行评估。

模型向导

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

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

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

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

- 2 在“选择空间维度”窗口中单击“三维”按钮。
- 3 在“选择物理场”树中展开“结构力学”节点，然后单击“机电”。
- 4 单击“添加”按钮，然后单击“研究”。
- 5 在“所选物理场接口的预设研究”下的树中，单击“稳态”。
- 6 单击“完成”。

几何 1

我们从外部文件导入几何。由于几何结构是对称的，因此只需四分之一的物理几何。

导入 1

- 1 在“几何”工具栏中单击“插入序列”。

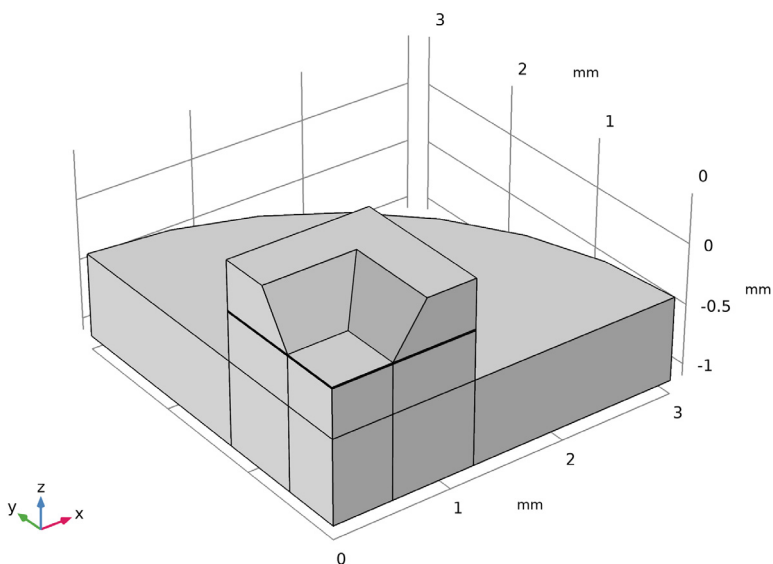
注：在 Linux 和 Mac 上，该工具栏是指 Desktop 顶部附近的一组特定控件。

- 2 浏览至案例库文件夹 MEMS_Module\Sensors 中的
capacitive_pressure_sensor_geom_sequence.mph 文件。

注：案例库根文件夹的位置根据安装目录的不同而有所变化。例如，如果安装在硬盘上，文件路径应类似于 C:\Program

Files\COMSOL\COMSOL54\Multiphysics\applications\。

- 3 单击“全部构建”。
- 4 单击“图形”窗口顶部的“缩放到窗口大小”按钮。



全局定义

参数

- 1 在“主屏幕”工具栏中单击“参数” P_1 。
- 2 在“参数”“设置”窗口的“参数”表中，输入以下设置：

名称	表达式	描述
p0	20[kPa]	压力
T0	20[degC]	工作温度
Tref	70[degC]	芯片粘合温度

注：在 COMSOL Desktop 图形用户界面中输入 SI 单位或其倍数单位（如 Pa、kPa 等），甚至是某些非 SI 单位（如摄氏度）时，可以用方括号括起来。请参见 *COMSOL Multiphysics Reference Manual* 中的“Using Units”一节，获取受支持单位的详细列表。

定义

接下来，添加一个组件耦合以计算从模型派生的全局物理量。这些算子可以方便地用于后处理和模型设置，例如，在方程组中包含积分量。本例添加了一个平均算子，用于计算隔膜的平均位移，并使用一个点积分来得到隔膜中心点的位移。

平均值 1

- 1 在“定义”工具栏中单击“组件耦合” 并选择“平均值”。
- 2 在“平均值”的“设置”窗口中，定位到“源选择”栏。从“几何实体层”列表中选择“边界”。
- 3 选择“边界”12。

注：选择几何实体的方法有多种。例如，要选择边界，可以在图形窗口中将光标放置在该边界的上方。如果所需边界没有以红色突出显示，则旋转鼠标滚轮直至该边界突出显示，然后单击将其选中（也可以使用向上和向下箭头键代替滚轮）。不仅如此，您还可以单击“粘贴选择”按钮。在“粘贴选择”对话框的“选择”文本框中键入12（边界编号），然后单击“确定”。另一种方法是使用“选择列表”来显示可用边界编号的列表（如果您使用Windows平台，可以访问“主屏幕>窗口”菜单；如果是其他平台，则访问“窗口”菜单）。通过单击边界，然后单击“添加到选择”，即可将边界添加到选择中。要添加多个边界，可以在按住Ctrl键的同时进行单击。

积分 1

- 1 在“定义”工具栏中单击“组件耦合” 并选择“积分”。
- 2 在“积分”的“设置”窗口中，定位到“源选择”栏。从“几何实体层”列表中选择“点”。
- 3 仅选择“点”4。

接下来，定义多个选择以简化材料和物理场特征的建立过程。

显式 1

- 1 在“定义”工具栏中单击“显式”。
- 2 仅选择“域”3和4。
- 3 在“标签”文本框中输入静电。

固体力学

接下来，我们在模型中添加物理场特征设置，包括作用在传感器上的压力、施加的感应电压以及其他适当的边界条件。

首先选择“固体力学”物理场接口的域。

1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”节点下，单击“固体力学 (solid)”。

2 在“固体力学”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。

3 从“选择”列表中，选择“线弹性”。

为对称边界应用结构对称边界条件。

对称 1

1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“对称”。

2 在“对称”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。从“选择”列表中选择“XZ 对称平面”。

对称 2

1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“对称”。

2 在“对称”的“设置”窗口中，定位到“边界选择”栏。从“选择”列表中选择“YZ 对称平面”。

注：默认情况下，会应用电对称边界条件（“零电荷”特征）。

结构的运动在大多数方向上受结构对称边界条件的约束。不过，整个设备仍能沿 z 轴上下滑动。可以施加点约束来防止这种情况。

指定位移 1

1 在“物理场”工具栏中，单击“点” 并选择“指定位移”。

2 仅选择“点”44。

3 在“指定位移”的“设置”窗口中，定位到“指定位移”栏。选中“在 z 方向指定”复选框，保留输入框的默认值 0。

施加边界载荷来表示作用在隔膜顶面的压力。

边界载荷 1

1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“边界载荷”。

2 仅选择“边界”13。

3 在“边界载荷”的“设置”窗口中，定位到“力”栏。

- 从“载荷类型”下拉菜单中选择“压力”。
- 在 p 文本框中输入 p_0 。

定义

我们必须对变形空气域应用动网格条件。

变形域 1

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“组件 1 (comp1) > 定义 > 动网格”节点 ，然后单击“变形域 1” .
- 2 在“变形域”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。从“选择”下拉菜单中选择“型腔”。

对称 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 定义 > 动网格”节点  下，单击“对称 1” .
- 2 仅选择“边界” 7 和 8。

此操作使网格可以沿 z 方向移动。

静电

在模型中添加终端和接地特征，为模型的静电部分应用边界条件。

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”节点下，单击“静电 (es)” .
- 2 在“静电”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。从“选择”下拉菜单中选择“静电”。

默认的“电荷守恒”特征设为使用固体材料类型。再添加一个特征来表示非固体 (void) 域。

电荷守恒 2

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“域”  并选择“电荷守恒” 。请注意，“材料类型”下拉菜单的默认选择为“非固体”。这适用于封闭域（型腔）。
- 2 在“电荷守恒”的“设置”窗口中，定位到“域选择”栏。从“选择”下拉菜单中选择“型腔”。

假设硅膜是良导体，我们可以使用“域”的“终端”特征在域中设置偏置电压。

注：“域”的“终端”特征非常适用于具有复杂形状和许多外部边界的导电域 - 我们无需选择所有边界来设置“接地”、“终端”或“电势”边界条件，只需选择域来指定“域”的“终端”，便能达到同样的效果。此外，由于“域”“终端”内的静电自由度不要求解，因此可以减少计算量。

终端 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“域” 并选择“终端”。
- 2 仅选择“域”4。
- 3 在“终端”的“设置”窗口中，定位到“终端”栏。从“终端类型”下拉菜单中选择“电压”。

本实例可以直接采用默认值 1 V。

接地 1

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“接地”。
- 2 仅选择“边界”9。

材料

压力传感器由一个带封闭腔的硅芯片组成。它在封装过程中粘合到一个圆柱形钢板上。COMSOL 提供的“材料库”包含许多预定义的材料属性。钢板使用了预定义的材料，但硅使用的是用户定义的材料，对此模型而言，使用各向同性材料参数，以便同 *Practical MEMS* 一书中的结果直接进行比较。型腔也需要“材料”属性（用来定义相对介电常数），该区域使用一种用户定义的材料将相对介电常数设为 1。

材料 1

- 1 在“材料”工具栏中单击“空材料”。
- 2 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“材料属性明细”栏。在表中输入以下设置：

属性	名称	值
相对介电常数	epsilon...	11.7
杨氏模量	E	170[GPa]
泊松比	nu	0.06
密度	rho	2330

- 3 在“标签”文本框中输入硅。

默认情况下，第一种材料会应用到所有域。在添加其他材料时，其中某些选择将被替代。

材料 2

- 1 在“材料”工具栏中单击“空材料”。

- 2 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“几何实体选择”栏。从“选择”下拉菜单中选择“型腔”。
- 3 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“材料属性明细”栏。在表中输入以下设置：

属性	名称	值
相对介电常数	epsilon _r	1

将材料设为非固体。这一步非常重要，可以确定当材料压缩时其在泊松方程中的特性。固体材料的介电常数在材料压缩时增加，而非固体材料则不会发生这种情况。

- 4 单击以展开“材料属性”栏。从“材料类型”下拉菜单中选择“非固体”。
- 5 在“标签”文本框中输入真空。

Steel AISI 4340

- 1 在“材料”工具栏中单击“添加材料”.
- 2 转到“添加材料”窗口。单击以展开“内置材料”树节点，然后选择 Steel AISI 4340 .
- 3 单击  “添加到组件”。然后单击“材料”工具栏中的“添加材料” 以关闭该窗口。
- 4 在“模型开发器”窗口中单击 Steel AISI 4340 .
- 5 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“几何实体选择”栏。从“选择”下拉菜单中选择“钢底座”。

网格 1

接下来，建立结构化网格，用于求解问题。

映射 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”下，右键单击“网格 1” 并选择“更多操作 > 映射”.
- 2 仅选择“边界” 3、16 和 32。

大小 1

在传感器隔膜上设置最大单元大小。

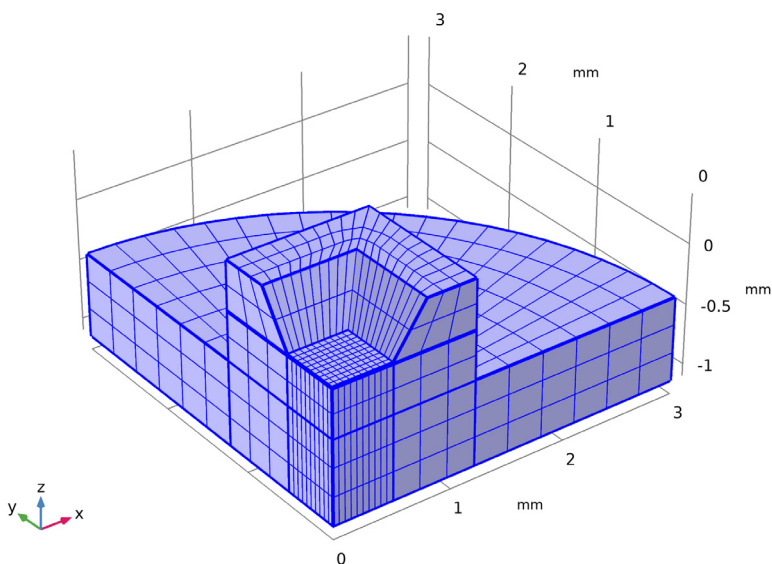
- 1 右键单击“映射 1” 并选择“大小”.
- 2 在“大小”的“设置”窗口中，定位到“单元大小”栏。单击“定制”按钮。

- 3 定位到“单元大小参数”栏。选中“最大单元大小”复选框。在关联文本框中输入 50[um]。
- 4 定位到“几何实体选择”栏。边界 3、16 和 32 已预先选定。通过单击不需要的编号（16 和 32），然后按键盘上的 Delete 键，将选择改为仅包含“边界”3。
- 5 单击“全部构建”按钮 。

对整个结构扫掠表面网格。

扫掠 1

- 1 右键单击“网格 1” 并选择“扫掠”。
- 2 单击“全部构建”。



研究 1

创建一个研究，用于扫描各种外加压力，从而评估传感器的响应。

步骤 1：稳态

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“研究 1”节点，然后单击“步骤 1：稳态”。

- 2 在“稳态”的“设置”窗口中，单击以展开“研究扩展”栏。选中“辅助扫描”复选框。
- 3 单击“添加”。
- 默认情况下，系统会添加连续参数 p_0 （压力）。这是要扫描的正确参数。
- 4 单击“范围”按钮。此时打开“范围”对话框。
 - 在“起始”文本框中输入 0。
 - 在“步长”文本框中输入 5000。
 - 在“停止”文本框中输入 25000。
- 5 单击“添加”按钮。
- 6 在“主屏幕”工具栏中单击“计算”。

结果

位移 (solid)

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果”节点下，单击“位移 (solid)”。
- 在本次初始研究中，大部分结构基本上都是零位移。为了便于结果分析，可在解中添加一个选择，以使绘图仅显示所需的域。

数据集

在“模型开发器”窗口中，展开“结果 > 数据集”节点，然后单击“研究 1/ 解 1 (sol1)”。

选择

- 1 在“结果”工具栏中，单击“选择”。
- 2 在“选择”的“设置”窗口中，定位到“几何实体选择”栏。从“几何实体层”下拉菜单中选择“域”。
- 3 从“选择”下拉菜单中选择“静电”。
- 4 选中“传播到较低维度”复选框。

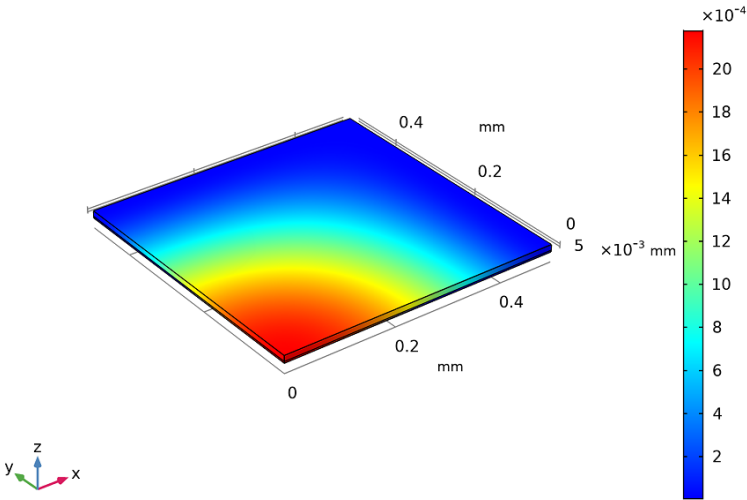
位移 (solid)

- 1 在“模型开发器”树中单击“位移 (solid)”节点。

2 单击“图形”窗口顶部的“缩放到窗口大小”按钮 。

$p_0(6)=25000 \text{ Pa}$

表面: 总位移 (mm)



此时的绘图仅显示隔膜的位移，和预期一样，传感器中心的位移最大。
接下来，绘制传感器隔膜与接地平面之间的 xy 方向平面的电势。

电势 (es)

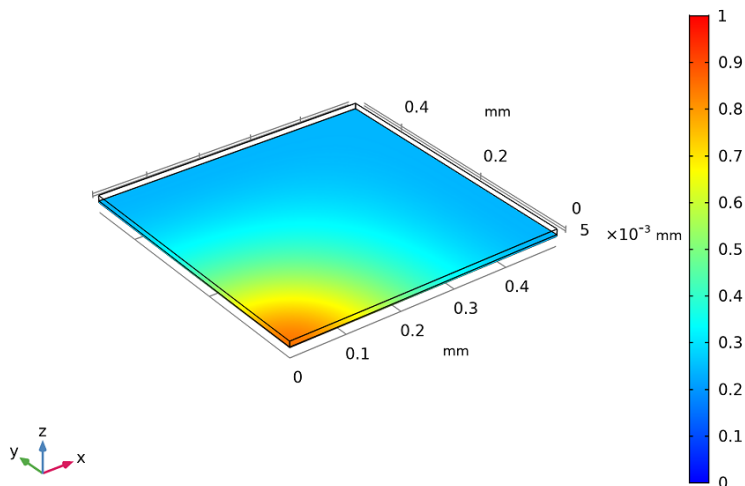
- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“结果 > 电势 (es)”节点 ，然后单击“多切面 1” 。
- 2 在“多切面”的“设置”窗口中，定位到“多平面数据”栏。
 - 找到“ x 平面”子栏。在“平面数”文本框中键入 0。
 - 找到“ y 平面”子栏。在“平面数”文本框中键入 0。
 - 找到“ z 平面”子栏。从“定义方法”下拉菜单中选择“坐标”。
 - 在“坐标”文本框中键入 $-0.0023[\text{mm}]$ 。
- 3 单击以展开“范围”栏。选中“手动控制颜色范围”复选框。
 - 在“最小值”文本框中键入 0。
 - 在“最大值”文本框中键入 1。

选择 1

- 1 右键单击 “结果 > 电势 (es) > 多切面 1” 并单击 “选择”。
- 2 在 “选择” 的 “设置” 窗口中，定位到 “选择” 栏。从 “选择” 下拉菜单中选择 “型腔”。
- 3 在 “电势 (es)” 工具栏中单击 “绘制” 按钮。

p0(6)=25000 Pa

多切面: 电势 (V)



薄膜的变形导致平面上的电势分布不均匀，该平面在恒定的高度穿过型腔。接下来绘制薄膜的变形随压差的变化情况，生成平均位移和最大位移的绘图。

一维绘图组 3

- 1 在 “主屏幕” 工具栏中，单击 “添加绘图组” 并选择 “一维绘图组”。
- 2 在 “一维绘图组 3” 工具栏中，单击 “全局”。

全局 1

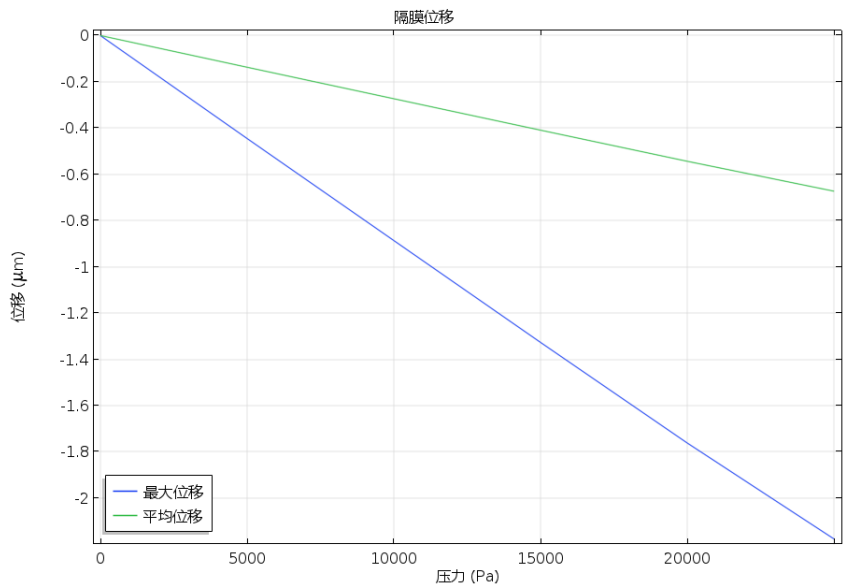
使用先前定义了点积分和表面平均算子来评估薄膜中点的位移和平均位移。

- 1 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“y 轴数据”栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
intop1(w)	um	最大位移
aveop1(w)	um	平均位移

一维绘图组 3

- 1 在“模型开发器”窗口中单击“一维绘图组 3”。
- 2 在“一维绘图组 3”的“设置”窗口中，单击以展开“标题”栏。
 - 从“标题类型”下拉菜单中选择“手动”。
 - 在“标题”文本框中输入隔膜位移。
- 3 定位到“绘图设置”栏。
 - 选中“x 轴标签”复选框。在“x 轴标签”文本框中输入压力 (Pa)。
 - 选中“y 轴标签”复选框。在“y 轴标签”文本框中输入位移 (μm)。
- 4 单击以展开“图例”栏。从“位置”列表中选择“左下角”。
- 5 在“标签”文本框中输入隔膜位移 vs. 压力。
- 6 在“隔膜位移 vs. 压力”工具栏中单击“绘制”。



在 10 kPa 外加压力的作用下，隔膜中心的位移为 0.89 μm 。隔膜的平均位移为 0.27 μm 。这些值与 Practical MEMS 一书中给出的近似模型完全吻合（最大位移为 0.93 μm ，平均位移为 0.27 μm ）。

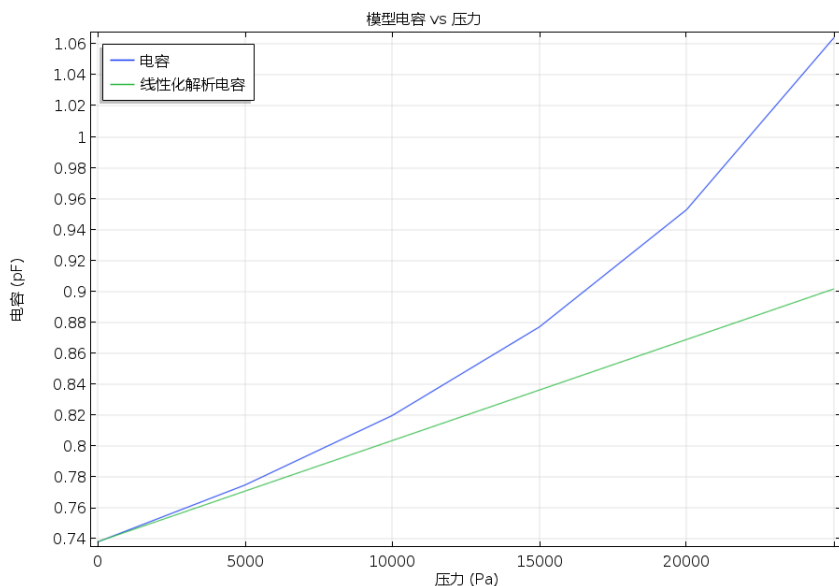
现在，绘制传感器电容随外加压力的变化情况。如果使用 *Practical MEMS* 中描述的开关电容放大器来产生输出，则传感器输出或传递函数与电容变化成正比。

一维绘图组 4

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加绘图组” 并选择“一维绘图组”。
- 2 在“一维绘图组 4”工具栏中，单击“全局”。
由于隔膜底面使用了终端边界条件，因此 COMSOL 可以自动计算对地电容。电容值可以用作结果分析中的变量。
- 3 在“全局”的“设置”窗口中，单击“y 轴数据”栏右上角的“替换表达式”。从菜单导航至“组件 1 > 静电 > 终端 > es.C11 - 麦克斯韦电容”，然后双击选择该项。
接下来，将计算得到的电容与小位移（*Practical MEMS* 一书中派生的线性化解析表达式）进行比较。
- 4 定位到“y 轴数据”栏。在表格中，将第一行的单位改为 pF，然后输入第二行，如下所示：

表达式	单位	描述
es.C11	pF	电容
0.738[pF]*(1+8.87e-6[1/Pa]*p0)	pF	线性化解析电容

- 5 在“模型开发器”窗口中单击“一维绘图组 4”。
- 6 在“一维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“标题”栏。
 - 从“标题类型”列表中选择“手动”。
 - 在“标题”文本区中输入模型电容 vs. 压力。
- 7 定位到“绘图设置”栏。
 - 选中“x 轴标签”复选框。在“x 轴标签”文本框中输入压力 (Pa)。
 - 选中“y 轴标签”复选框。在“y 轴标签”文本框中输入电容 (pF)。
- 8 定位到“图例”栏。从“位置”列表中选择“左上角”。
- 9 在“标签”文本框中输入模型电容 vs. 压力。
- 10 单击“绘制”。



传感器的电容随着外加压力的增大而增加。绘制的曲线梯度直观地呈现了设备的响应情况。在原点位置，模型（传感器的 1/4）的响应为 $7.3 \times 10^{-6} \text{ pF/Pa}$ ，与简单的分析响应值 $6.5 \times 10^{-6} \text{ pF/Pa}$ 进行比较。由此可以得到整个传感器的响应为 $29 \times 10^{-6} \text{ pF/Pa}$ ，与解析值 $26 \times 10^{-6} \text{ pF/Pa}$ 进行比较。使用 Practical MEMS 中提出的测量电路的仿真结果，相当于 COMSOL 传感器模型采用传递函数 $29 \mu\text{V/Pa}$ ，以及简单解析模型采用 $26 \mu\text{V/Pa}$ 。由于响应表现为非线性，因此在 20 kPa 作用下，模型输出为 $14 \times 10^{-6} \text{ pF/Pa}$ （设备输出 57 pF/Pa）。

接下来，在模型中添加热膨胀，以评估封装应力对设备性能的影响。

固体力学

在“物理场”工具栏中，单击“静电 (es)” 并选择“固体力学 (solid)”.

热膨胀 1

- 1 在“模型开发器”窗口中展开“固体力学 (solid)”，然后单击“线弹性材料 1”。在“物理场”工具栏中，单击“属性” 并选择“热膨胀”。

模型温度应设为先前定义的室温参数 T_0 。

- 2 在“热膨胀”的“设置”窗口中，定位到“模型输入”栏。在 T 文本框中输入 T_0 。

参考温度是指结构不产生热应变的温度。在本例中，我们将其设为先前定义的参数 T_{ref} 。 T_{ref} 表示硅芯片粘合到金属载板的温度。

- 3 定位到“热膨胀属性”栏。在 T_{ref} 文本框中输入 T_{ref} 。

材料

之前为硅添加的用户定义属性不包含热膨胀系数，因此必须添加这一属性。

硅

COMSOL 会在材料属性设置中显示警告以提示缺少的属性。

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 材料” 下，单击 Silicon 。
- 2 在“材料”的“设置”窗口中，定位到“材料属性明细”栏。
- 3 在表格的相应行中，为硅的热膨胀系数添加一个值：

属性	名称	值
热膨胀系数	alpha...	2.6e-6

研究 2

添加一个新研究以计算包含热膨胀效应的系统响应。

添加研究

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加研究” 以打开相应的窗口。
- 2 转到“添加研究”窗口。在研究树的“预设研究”分支下，单击“稳态”。
- 3 单击  “添加研究”。然后单击“主屏幕”工具栏中的“添加研究” 以关闭该窗口。

步骤 1: 稳态

- 1 在“稳态”的“设置”窗口中，定位到“研究扩展”栏。选中“辅助扫描”复选框。
- 2 单击“添加”。
默认情况下，系统会添加连续参数 $p0$ (压力)。这是要扫描的正确参数。
- 3 单击“范围”。此时打开“范围”对话框。
 - 在“起始”文本框中输入 0。
 - 在“步长”文本框中输入 5000。
 - 在“停止”文本框中输入 25000。
- 4 单击“添加”按钮。
- 5 在“主屏幕”工具栏中单击“计算”。

结果

创建一个镜像数据集以将设备的横截面可视化。

数据集

- 1 在“结果”工具栏中，单击“更多数据集” 并选择“三维镜像”。
- 2 在“三维镜像”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”下拉菜单中选择“研究 2/ 解 2”。

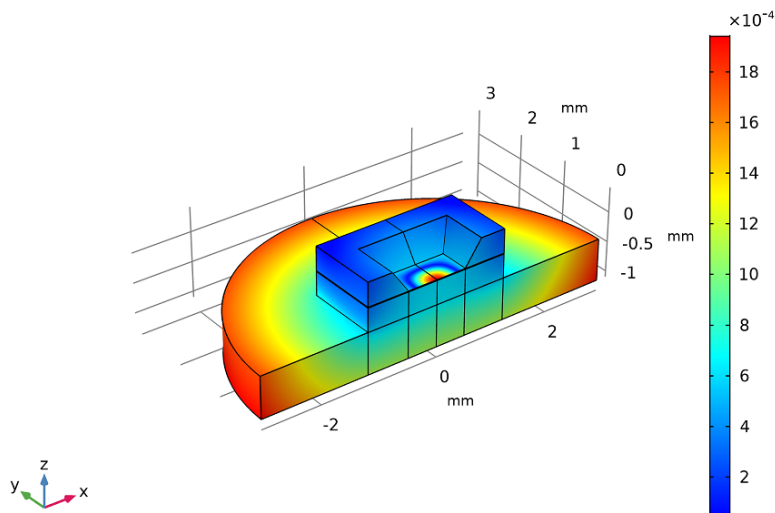
位移 (solid) 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果”节点下，右键单击“位移 (solid)” 并选择“生成副本”。
- 2 在“三维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”下拉菜单中选择“三维镜像 1”。
- 3 单击“绘制”按钮。

请注意，在热应力作用下，此时整个结构在室温下发生非零位移。

p0(6)=25000 Pa

表面: 总位移 (mm)



现在，我们来看看热应力对传感器响应的影响。

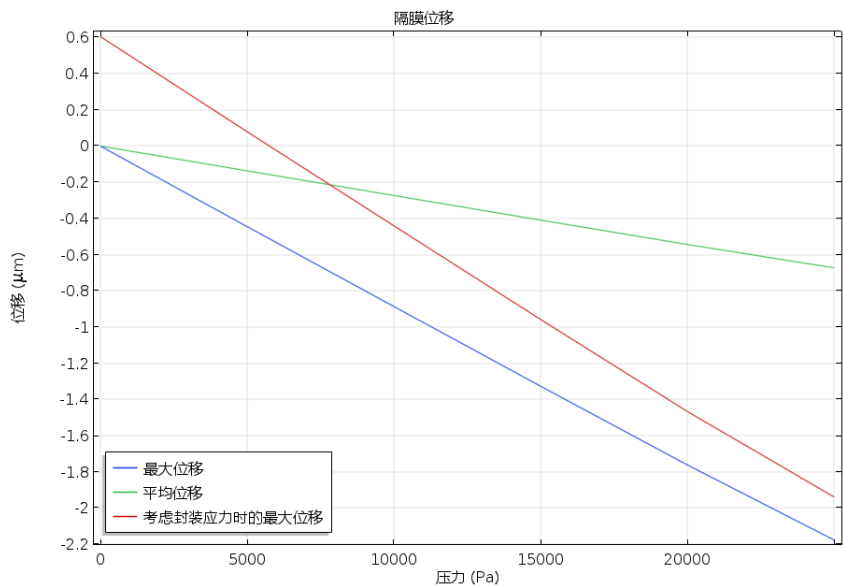
为先前定义的绘图添加一个附加的全局节点。这个单独的节点可以指向其他数据集，从而在无应力的绘图旁创建设备在热应力作用下的位移图。

隔膜位移 vs. 压力

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果 > 隔膜位移 vs. 压力”节点下，右键单击“全局 1”并选择“生成副本”。
- 2 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”列表中选择“研究 2/ 解 2”。
- 3 定位到“y 轴数据”栏。在表格的第一行输入以下设置，并移除第二行 (aveop1):

表达式	单位	描述
intop1(w)	um	封装应力作用下的最大位移

4 单击“绘制”按钮 。



由于封装应力作用，在外加压力为零时，薄膜的最大位移为非零。位移 - 压力线的梯度也发生了变化。

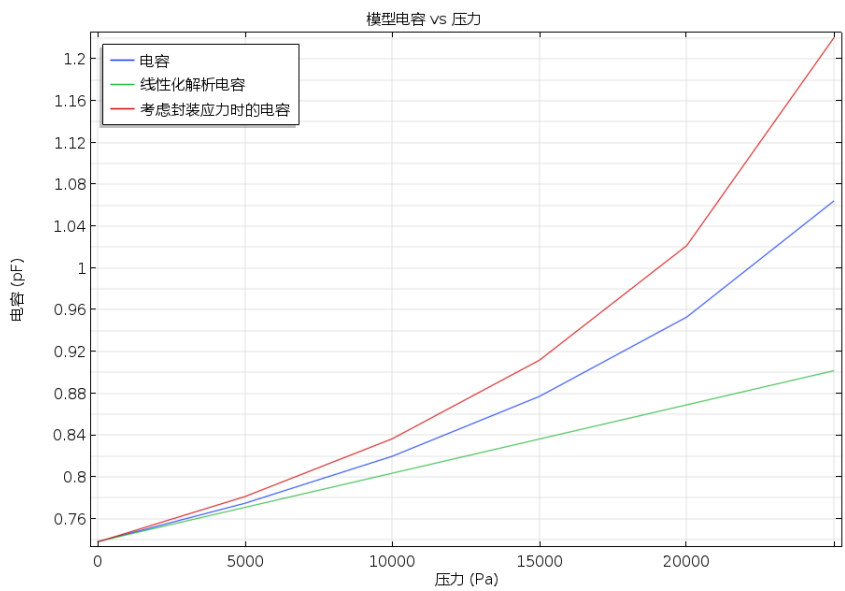
模型电容 vs. 压力

现在，我们为“电容 vs. 压力”绘图添加热应力作用下的结果。

- 1 单击“模型电容 vs. 压力”节点 。在“模型电容 vs. 压力”工具栏中单击“全局”。
- 2 在“全局”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”列表中选择“研究 2/ 解 2”。
- 3 单击“y 轴数据”栏右上角的“替换表达式”。从菜单导航至“组件 1 > 静电 > 终端 > es.C11 - 麦克斯韦电容”，然后双击选择该项。
- 4 定位到“y 轴数据”栏。在表格中，修改第一行，使之与以下设置相符（请注意，单位应更改为 pF，以同之前的“全局”绘图匹配）：

表达式	单位	描述
es.C11	pF	封装应力作用下的电容

5 单击“绘制”按钮 。



封装应力导致设备响应发生了明显的变化。当外加压力为零时，COMSOL 模型的灵敏度增至 10×10^{-6} pF/Pa（整个设备为 40×10^{-6} pF/Pa）。与无应力情况下的值 7.3×10^{-6} pF/Pa（整个设备为 29×10^{-6} pF/Pa）进行比较。当压力为 20 kPa 时，作用更为明显，包含热应力的模型显示的压力灵敏度为 25×10^{-6} pF/Pa（整个设备为 100 pF/Pa），与无应力情况下的压力灵敏度 14×10^{-6} pF/Pa（传感器输出 57 pF/Pa）进行比较。

您可以对设备进行校准，从而消除封装应变的影响。不过，由于热应变的温度灵敏度，传感器的响应现在变得与温度相关，因此在系统中添加热应力后产生了另一个问题。接下来，我们通过最后一个研究来评估这一效应。

研究 3

添加研究

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加研究”按钮以打开相应的窗口。
- 2 转到“添加研究”窗口。在研究树的“预设研究”分支下，选择“稳态”.
- 3 单击“添加研究”。然后再次单击工具栏中的“添加研究”以关闭该窗口。

步骤 1：稳态

- 1 在“模型开发器”窗口的“研究 3”节点下，单击“步骤 1：稳态”.
- 2 在“稳态”的“设置”窗口中，定位到“研究扩展”栏。选中“辅助扫描”复选框。

在恒定外加压力作用下基于工作温度进行扫描，以评估设备的温度灵敏度。
- 3 单击“添加”.
- 4 在第一个表格单元格的下拉菜单中选择参数 T0（工作温度）：

参数名称
T0

- 5 单击“范围”。此时打开“范围”对话框。
 - 在“起始”文本框中输入 290。
 - 在“步长”文本框中输入 5。
 - 在“停止”文本框中输入 300。
- 6 单击“添加”按钮。

此研究将禁用默认绘图，因为它们与研究 2 中已生成的绘图相似。
- 7 在“模型开发器”窗口中单击“研究 3”.
- 8 在“研究”的“设置”窗口中，定位到“研究设置”栏。清除“生成默认绘图”复选框。
- 9 单击“计算”.

结果

我们添加一个绘图来显示传感器响应随温度的变化情况。响应在外加压力条件下进行计算，该压力由参数 p_0 的值设置，定义为 20 kPa。

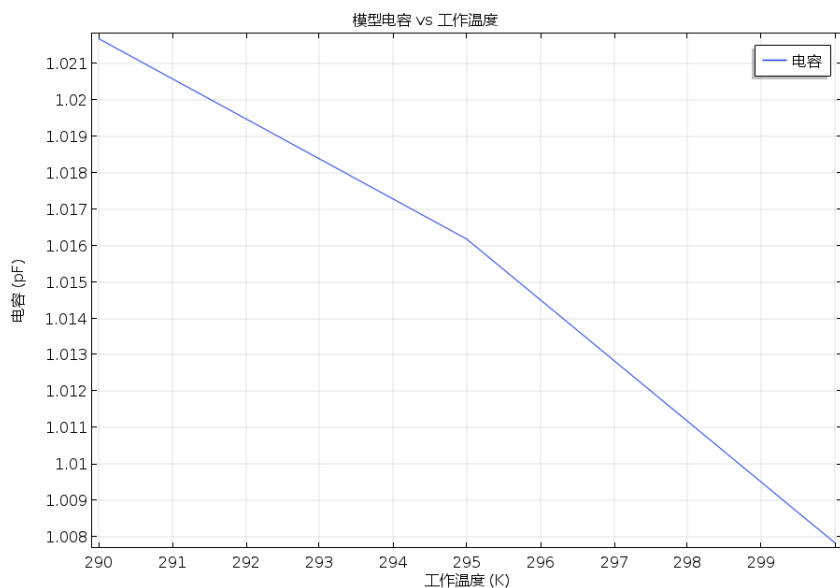
一维绘图组 8

- 1 在“主屏幕”工具栏中，单击“添加绘图组” 并选择“一维绘图组”.
- 2 在“一维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。从“数据集”列表中选择“研究 3/ 解 3”。
- 3 在“一维绘图组 8”工具栏中，单击“全局”.
- 4 在“全局”的“设置”窗口中，单击“y 轴数据”栏右上角的“替换表达式”。从菜单导航至“组件 1 > 静电 > 终端 > es.C11 - 麦克斯韦电容”，然后双击将其选中。
- 5 定位到“y 轴数据”栏。在表格中，修改第一行，使之与以下设置相符：

表达式	单位	描述
es.C11	pF	电容

- 6 在“模型开发器”中单击“一维绘图组 8”.
- 7 在“一维绘图组”的“设置”窗口中，定位到“标题”栏。
 - 从“标题类型”列表中选择“手动”。
 - 在“标题”文本区中输入模型电容 vs. 工作温度。
- 8 定位到“绘图设置”栏。
 - 选中“x 轴标签”复选框。在关联文本框中输入工作温度 (K)。
- 9 在“标签”文本框中输入电容 vs. 工作温度。

10 单击“绘制”。



图中的曲线梯度给出了压力为 20 kPa 时模型的温度灵敏度，约为 3.5×10^{-3} pF/K（整个设备为 14×10^{-3} pF/K）。在 20 kPa 时给出的压力灵敏度为 25×10^{-6} pF/Pa（设备的四分之一），相当于传感器输出中的等效压力为 140 Pa/K。与 *Practical MEMS* 中提出的测量电路的本底噪声 (0.6 Pa) 相比，这个数字非常大。此模型表明，简单的包装可能对传感器性能产生极为不利的影响。