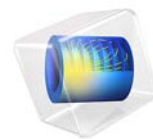


在 COMSOL Multiphysics 5.4 版本中创建



电感器三维建模

简介

在很多应用领域中，电感器常用于低通滤波，或者是对容性主导负载的阻抗匹配。其适用的频率范围非常广，从接近静态直至若干 MHz。电感器通常都使用磁芯，以在不增大器件尺寸的情况下增强电感。磁芯还可降低其他器件的电磁干扰，因为磁通量趋向于位于磁芯内部。由于阻抗计算只有粗略的解析表达式或经验公式，因此设计阶段需要使用计算机进行仿真或测量。一般而言，电感器的建模要比电阻器和电容器的建模复杂，但应用的原理相似。模型的几何结构使用外部 CAD 软件设计，随后导入“AC/DC 模块”进行静态和频域分析。电感器几何结构如图 1 所示。

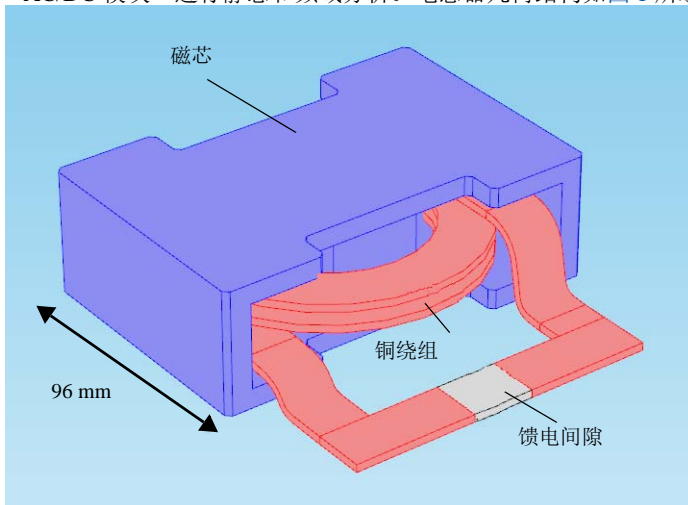


图1：电感器几何结构。

首先，执行静磁仿真以获得直流电感。在低频下，电容效应忽略不计。因此，等效电路模型是与理想电阻器串联起来的理想电感器。电感和电阻都可在静磁仿真中计算得到。在高频下，电容效应和集肤效应变得非常明显，并且等效电路模型中，理想电容与直流电路并联连接。集肤效应会改变绕组中的电流分布，使电阻增加，电感也发生变化。通过分析从频域仿真得到的与频率相关的阻抗，即可得出电路参数。本教程中，在得到与频率相关的阻抗结果之前，我们会一直进行交流分析。

模型定义

本 App 使用**磁场**接口，其中支持稳态、瞬态和频域建模。下表列出了所使用的材料属性：

材料参数	铜绕组	磁芯	空气
σ	$5.998 \cdot 10^7$ S/m	0 S/m	0 S/m
ϵ_r	1	1	1
μ_r	1	10^3	1

外边界默认设为磁绝缘，

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{0}$$

从电感的角度来看，等同于理想电导体。在静磁分析中，线圈由**线圈**特征模拟，通过**线圈几何分析**预处理步骤计算电流，然后施加 1 A 的总电流。对于频域分析，则是在馈电间隙施加固定电流为 1 A 的**集总端口**。

结果与讨论

静磁分析产生 0.11 mH 的电感和 0.29 m Ω 的直流电阻。图 2 显示磁通密度模和电流方向。

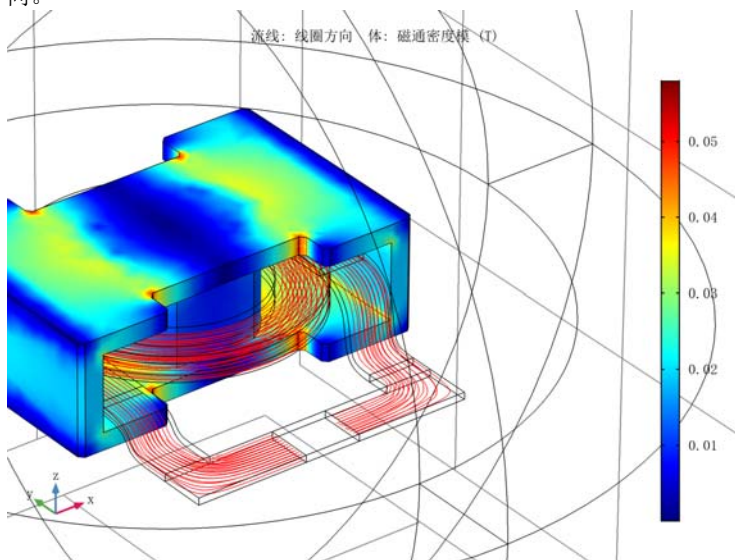


图2：静磁分析的磁通密度模和电流方向。

在静态（直流）极限中，沿绕组的电势降是纯电阻性的，原则上可以在计算磁通密度之前单独计算。频率增大时，电感效应开始限制电流，集肤效应使求解绕组中的电流分布变得越来越困难。当频率足够高时，电流主要在靠近导体表面的薄层中流动。进一步增加频率，开始产生电容效应，通过绕组的电流以位移电流密度的形式表示。达到谐振频率时，器件由电感器变为以电容性为主。达到自谐振时，由于内部电流非常

大，电阻损耗达到峰值。图 4 显示频率为 1 MHz 时的表面电流分布。在高频情况下，电流通常都流向导体边缘。

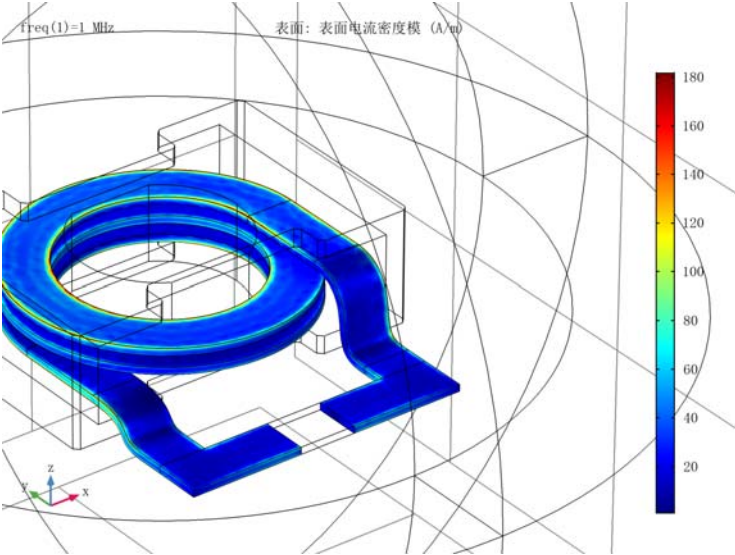


图3：频率为1 MHz（低于谐振频率）时的表面电流密度。

图 4 显示线圈阻抗的电阻部分在谐振频率为 6 MHz 附近达到峰值，而图 5 显示当频率高于谐振频率后，线圈阻抗的电抗值由正值变为负值，即从感性变为容性。

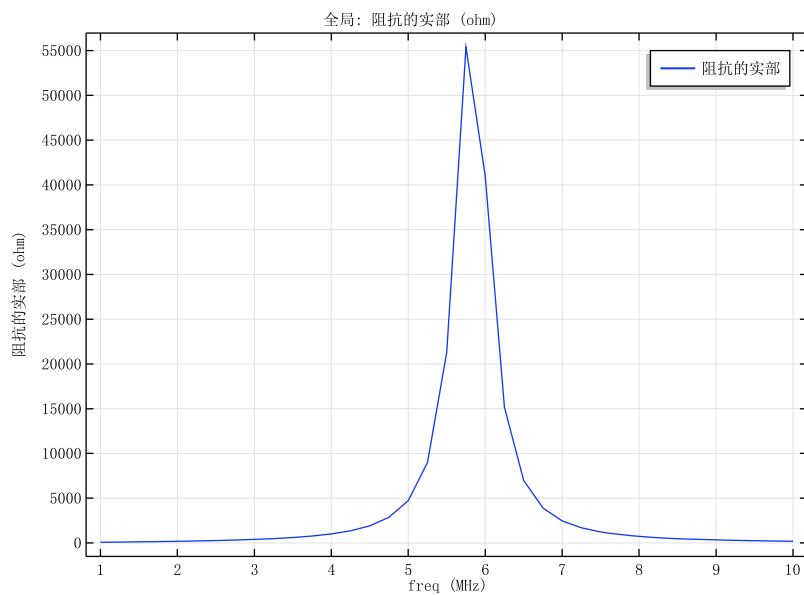


图4：线圈阻抗的实部在谐振频率处达到峰值。

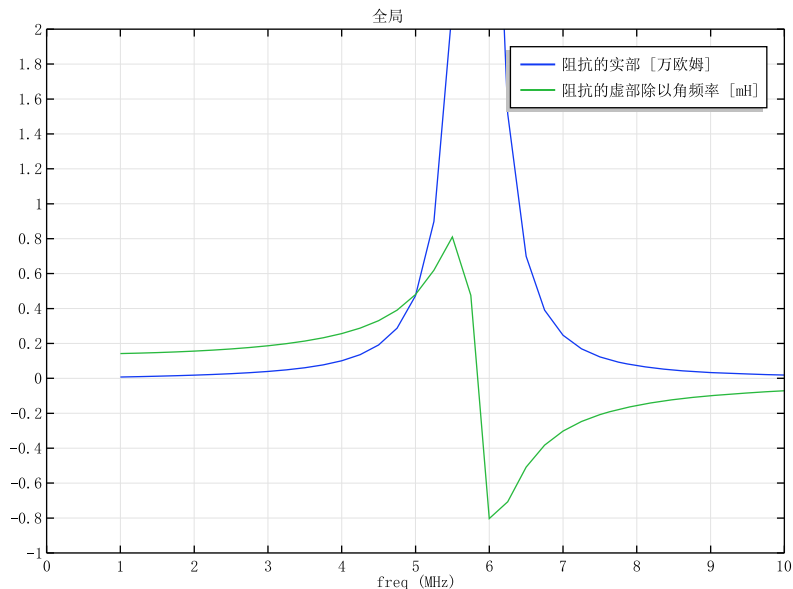


图5：当频率高于谐振频率后，线圈阻抗的电抗值由正值变为负值，即从感性变为容性。

案例库路径：ACDC_Module/Inductive_Devices_and_Coils/inductor_3d

建模操作说明

从文件菜单中选择**新建**。

新建

在**新建**窗口中，单击**模型向导**。

模型向导

- 1 在**模型向导**窗口中，单击**三维**。
- 2 在**选择物理场**树中选择 **AC/DC> 磁场 (mf)**。
- 3 单击**添加**。
- 4 在**添加的物理场接口**树中选择**磁场 (mf)**。

- 5 单击**研究**。
- 6 在**选择研究树**中选择**一般研究 > 稳态**。
- 7 单击**完成**。

几何 1

主要几何由文件导入。通常 CAD 几何模型并不包含空气域，所以我们常常需要手动加入。为简单起见，在 CAD 文件中定义了 3 个额外的几何域。这些操作用于定义一个狭窄的馈电间隙，以施加激励。

导入 1 (imp1)

- 1 在**主屏幕**工具栏中单击**导入**。
- 2 在**导入**的**设置**窗口中，定位到**导入**栏。
- 3 单击**浏览**。
- 4 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 inductor_3d.mphbin。
- 5 单击**导入**。

球体 1 (sph1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**球体**。
- 2 在**球体**的**设置**窗口中，定位到**大小**栏。
- 3 在**半径**文本框中键入“0.2”。
- 4 单击以展开**层**栏。在表中输入以下设置：

层名称	厚度 (m)
层 1	0.05

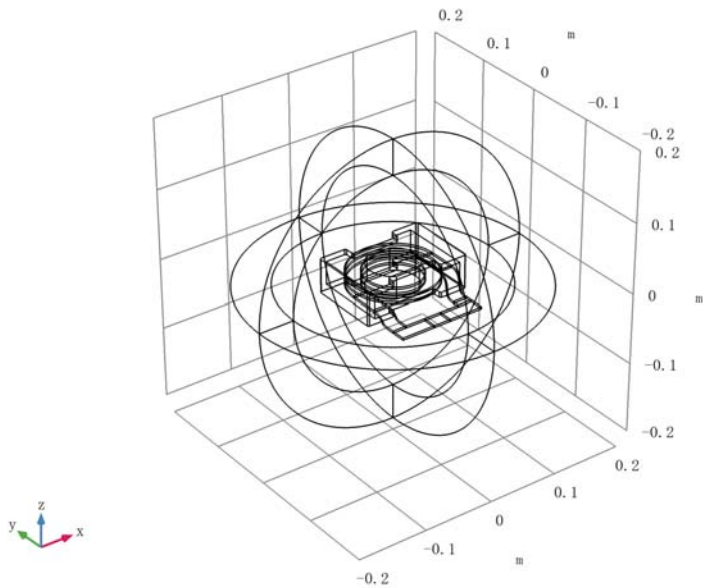
- 5 单击**构建所有对象**。

形成联合体 (fin)

- 1 在**几何**工具栏中单击**全部构建**。
- 2 在**图形**工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮。

3 在图形工具栏中单击**线框渲染**按钮。

几何应如下图所示。



材料

下一步，定义一系列选择，以便在定义物理场和材料时使用。首先定义电感器绕组的求解域组，然后添加其他选择。

定义

显式 1

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。
- 2 选择“域”7、8和14。
- 3 右键单击**显式 1**并选择**重命名**。
- 4 在**重命名“显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“绕组”。
- 5 单击**确定**。

显式 2

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。
- 2 选择“域”9。
- 3 右键单击**显式 2**并选择**重命名**。

- 4 在**重命名“显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“间隙”。
- 5 单击**确定**。

显式 3

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。
- 2 选择“域”6。
- 3 右键单击**显式 3**并选择**重命名**。
- 4 在**重命名“显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“铁芯”。
- 5 单击**确定**。

显式 4

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。
- 2 选择“域”1-4 和 10-13。
- 3 右键单击**显式 4**并选择**重命名**。
- 4 在**重命名“显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“无限元”。
- 5 单击**确定**。

显式 5

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。
- 2 选择“域”1-6 和 9-13。
- 3 右键单击**显式 5**并选择**重命名**。
- 4 在**重命名“显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“非导体”。
- 5 单击**确定**。

显式 6

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。
- 2 选择“域”5、6 和 9。
- 3 右键单击**显式 6**并选择**重命名**。
- 4 在**重命名“显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“不含无限元的非导体”。
- 5 单击**确定**。

通过无限元来计算电感器周围的无限开放空间。

无限元域 1 (iel)

- 1 在**定义**工具栏中单击**无限元域**。
- 2 在**无限元域**的设置窗口中，定位到**域选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**无限元**。

4 定位到几何栏。从类型列表中选择球面。

现在，定义材料设置。

添加材料

- 1 在主屏幕工具栏中，单击添加材料以打开添加材料窗口。
- 2 转到添加材料窗口。
- 3 在模型树中选择 AC/DC>Copper。
- 4 单击窗口工具栏中的添加到组件。
- 5 在模型树中选择内置材料 >Air。
- 6 单击窗口工具栏中的添加到组件。
- 7 在主屏幕工具栏中，单击添加材料以关闭添加材料窗口。

材料

Copper (mat1)

- 1 在材料的设置窗口中，定位到几何实体选择栏。
- 2 从选择列表中选择绕组。

Air (mat2)

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1)> 材料节点下，单击 Air (mat2)。
- 2 在材料的设置窗口中，定位到几何实体选择栏。
- 3 从选择列表中选择非导体。

材料库未包含铁芯材料，所以需要通过用户定义来输入其材料属性。

材料 3 (mat3)

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) 节点下，右键单击材料并选择空材料。
- 2 在材料的设置窗口中，定位到几何实体选择栏。
- 3 从选择列表中选择铁芯。
- 4 定位到材料属性明细栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
相对磁导率	mur_iso ; murii = mur_iso, murij = 0	1e3	1	基本
电导率	sigma_iso ; sigmaii = sigma_iso, sigmaij = 0	0	S/m	基本
相对介电常数	epsilon_iso ; epsilonii = epsilon_iso, epsilonij = 0	1	1	基本

- 5 右键单击**组件 1 (comp1)**> **材料**> **材料 3 (mat3)** 并选择**重命名**。
- 6 在**重命名 “材料”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“铁芯”。
- 7 单击**确定**。

磁场 (MF)

选择“域”1-8 和 10-14。

线圈 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**域**，然后选择**线圈**。
- 2 在**线圈**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**绕组**。
- 4 在**模型开发器**窗口中展开**线圈 1**节点。

输入 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**组件 1 (comp1)**>**磁场 (mf)**>**线圈 1**>**几何分析 1**节点，然后单击**输入 1**。
- 2 选择“边界”58。

输出 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**>**磁场 (mf)**>**线圈 1**节点下，右键单击**几何分析 1**并选择**输出**。
- 2 选择“边界”79。

接下来，在**磁场**接口中激活物理场控制的网格，这个功能将自动地创建适用于物理场接口所需的网格。本例中，这个功能在无限元区域创建了扫掠网格，这种网格可以在有限的单元数量情况下，高精度地处理径向上急剧变化的比例关系。

- 3 在**模型开发器**窗口中，单击**磁场 (mf)**。
- 4 在**磁场**的**设置**窗口中，定位到**物理场控制网格**栏。
- 5 选中**启用复选框**。

网格 1

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，右键单击**网格 1**并选择**全部构建**。

在**稳态**研究之前添加**线圈几何分析**研究步骤来计算线圈绕组中施加电流的方向。

研究 1

步骤 2：线圈几何分析

- 1 在**研究**工具栏中单击**研究步骤**，然后选择**其他**> **线圈几何分析**。

2 在**模型开发器**窗口的**研究 1**节点下，右键单击**步骤 2：线圈几何分析**并选择**上移**。

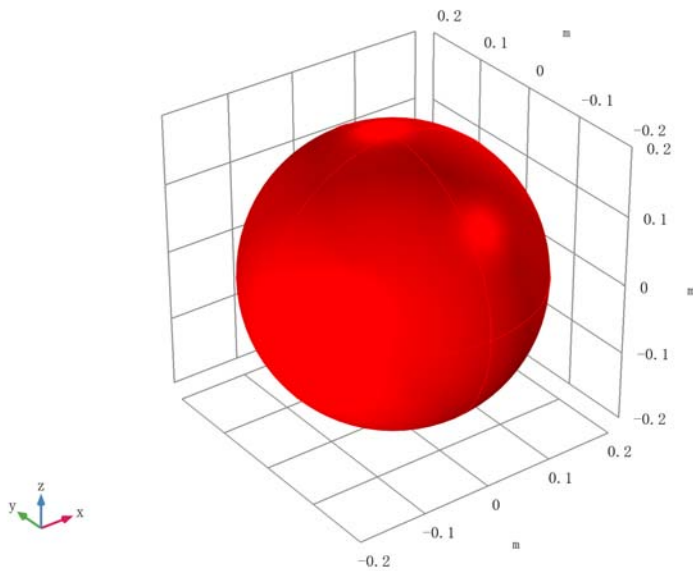
现在可以求解静磁场模型。

3 在**研究工具栏**中单击**计算**。

结果

研究 1/ 解 1 (sol1)

默认绘图组显示了磁通密度模，可以帮助我们发现建模中可能出现的错误。



下一段描述了如何通过操作数据集来获得专用于本问题的绘图。

1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 数据集**节点。

研究 1/ 解 1 (3) (sol1)

1 右键单击**研究 1/ 解 1 (sol1)**并选择**生成副本**。

2 在**模型开发器**窗口的**结果 > 数据集**节点下，右键单击**研究 1/ 解 1 (3) (sol1)**并选择**选择**。

选择

1 在**模型开发器**窗口的**结果 > 数据集 > 研究 1/ 解 1 (3) (sol1)**节点下，单击**选择**。

2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**几何实体选择**栏。

3 从**几何实体**列表中选择**域**。

4 从**选择**列表中选择**绕组**。

研究 1/ 解 1 (4) (sol1)

- 1 在模型开发器窗口的结果>数据集节点下，右键单击研究 1/解 1 (1) (sol1)并选择生成副本。
- 2 右键单击研究 1/ 解 1 (4) (sol1) 并选择选择。

选择

- 1 在模型开发器窗口的结果>数据集>研究 1/ 解 1 (4) (sol1) 节点下，单击选择。
- 2 在选择 的设置窗口中，定位到几何实体选择栏。
- 3 从几何实体层列表中选择域。
- 4 从选择列表中选择铁芯。

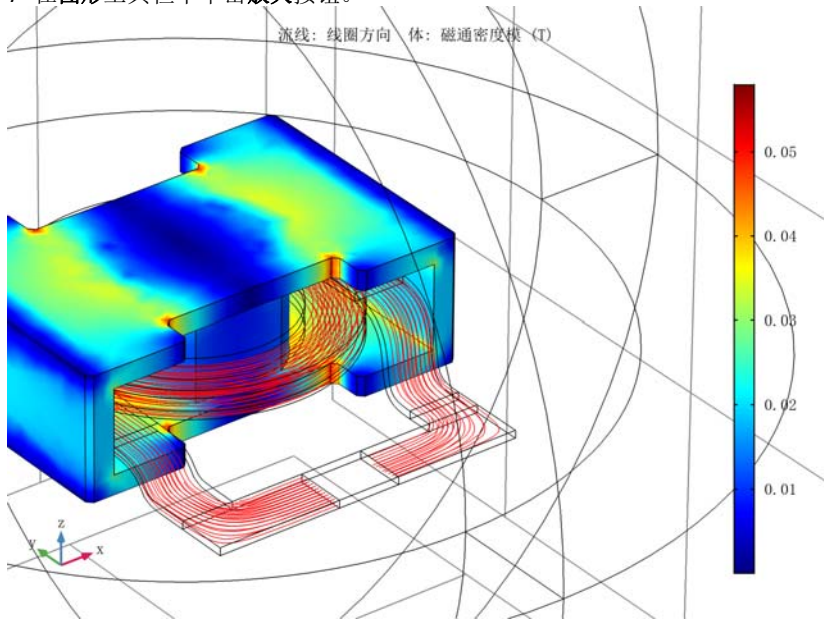
流线 1

- 1 在主屏幕工具栏中单击添加绘图组，然后选择三维绘图组。
- 2 在模型开发器窗口中，右键单击三维绘图组 2 并选择流线。
- 3 在流线的设置窗口中，单击表达式栏右上角的替换表达式。从菜单中选择模型>组件 1>磁场>线圈参数>mf.coil1.eCoilx,...,mf.coil1.eCoilz - 线圈方向。
- 4 选择“边界”58。

体 1

- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，右键单击三维绘图组 2 并选择体。
- 2 在体的设置窗口中，定位到数据栏。
- 3 从数据集列表中选择研究 1/ 解 1 (4) (sol1)。
- 4 在三维绘图组 2 工具栏中单击绘制。
- 5 在图形工具栏中单击缩放到窗口大小按钮。
- 6 在图形工具栏中单击放大按钮。

7 在图形工具栏中单击**放大**按钮。



派生值

下一步，计算线圈电感和电阻，并将它们分别与通过总磁能估算的电感和通过欧姆定律定义的电阻进行比较。

全局计算 1

- 1 在**结果**工具栏中单击**全局计算**。
- 2 在**全局计算**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。
- 3 在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
mf.RCoil_1	Ω	线圈电阻 (DC)
mf.LCoil_1	H	线圈电感
mf.VCoil_1/mf.ICoil_1	Ω	电压降定义
$2 * mf.intWm / mf.ICoil_1^2$	H	通过磁能密度计算的电感

- 4 单击**计算**。

表格

1 转到**表格**窗口。

这里的结果应分别约为 0.11 mH 和 0.29 mΩ。

现在，求解不包含无限元单元的模型。由于几乎所有的磁通量都驻留在磁芯区域，**无限元**的效果相当有限。如果忽略磁芯，使用无限元的效果将更明显。

磁场 (MF)

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，单击**磁场 (mf)**。

2 选择“域”5–8 和 14。

研究 1

在**主屏幕**工具栏中单击**计算**。

结果

全局计算 1

1 在**模型开发器**窗口的**结果 > 派生值**节点下，单击**全局计算 1**。

2 在**磁场的设置**窗口中，单击**计算**。

组件 1 (COMP1)

下一步，将一个简单电路连接到模型。

添加物理场

1 在**主屏幕**工具栏中，单击**添加物理场**以打开**添加物理场**窗口。

2 转到**添加物理场**窗口。

3 在模型树中选择**AC/DC > 电路 (cir)**。

4 单击窗口工具栏中的**添加到组件**。

5 在**主屏幕**工具栏中，单击**添加物理场**以关闭**添加物理场**窗口。

电路 (CIR)

更改线圈激励，将其连接至电路。

磁场 (MF)

线圈 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1) > 磁场 (mf)**节点下，单击**线圈 1**。

2 在**线圈**的**设置**窗口中，定位到**线圈**栏。

3 从线圈激励列表中选择电路（电流）。

电路（CIR）

在物理场工具栏中单击磁场（mf），然后选择电路（cir）。

电压源 V1

- 1 在电路工具栏中单击电压源。
- 2 在电压源的设置窗口中，定位到节点连接栏。
- 3 在表中输入以下设置：

标签	节点名称
n	0

电阻 R1

- 1 在电路工具栏中单击电阻。
- 2 在电阻的设置窗口中，定位到节点连接栏。
- 3 在表中输入以下设置：

标签	节点名称
p	1
n	2

- 4 定位到装置参数栏。在 R 文本框中键入 “100[mohm]”。

使用专用的电路元件，可以将电路模型与有限元模型连接在一起。

外部 I vs. U 1

- 1 在电路工具栏中单击外部 I vs. U。
- 2 在外部 I vs. U 的设置窗口中，定位到外部设备栏。
- 3 从 V 列表中选择线圈电压（mf/coil1）。
- 4 定位到节点连接栏。在表中输入以下设置：

标签	节点名称
p	2
n	0

研究 1

在主屏幕工具栏中单击计算。

结果

派生值

接下来，计算电流。

全局计算 2

- 1 在**结果**工具栏中单击**全局计算**。
- 2 在**全局计算**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。
- 3 在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
mf.ICoil_1	A	线圈电流

- 4 单击**计算**。

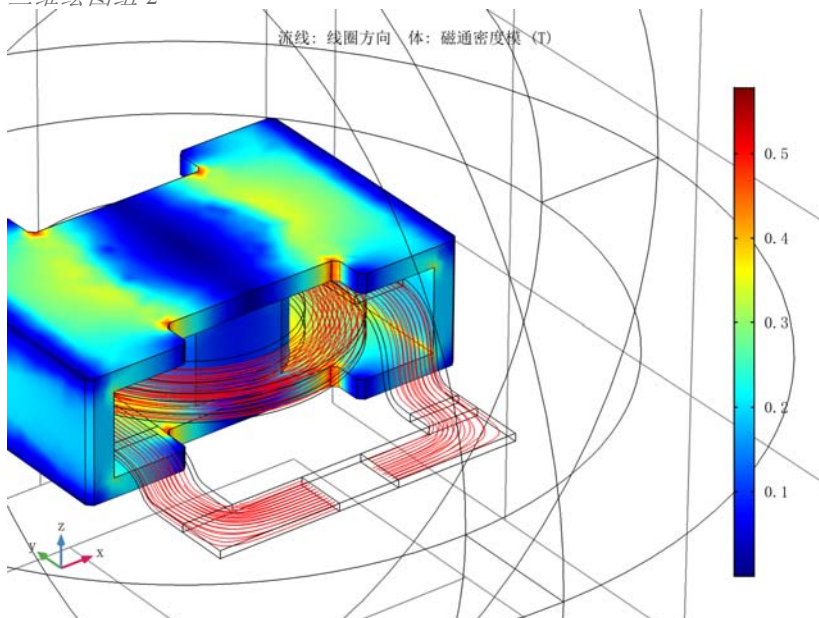
表格

- 1 转到**表格**窗口。

现在，电流值由外接电阻限制在大约 10 A，此外接电阻的阻值大大高于内部绕组。

结果

三维绘图组 2



现在设置模型，计算与频率相关的阻抗。

添加研究

- 1 在主屏幕工具栏中，单击**添加研究**以打开**添加研究**窗口。
- 2 转到**添加研究**窗口。
- 3 找到研究中的物理场接口子栏。在表格中，清除**电路 (cir)** 接口对应的**求解**复选框。
- 4 找到**研究**子栏。在**选择研究树**中选择**一般研究 > 频域**。
- 5 单击窗口工具栏中的**添加研究**。
- 6 在主屏幕工具栏中，单击**添加研究**以关闭**添加研究**窗口。

定义

高频情况下的集肤深度很小，难以解析。所以，使用一个在**材料**节点中正确定义了材料信息的损耗边界条件来代替求解整个域。还要创建一个**选择**节点来简化边界条件的指定。

显式 7

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。

- 2 选择“域”7、8和14。
- 3 在**显式**的**设置**窗口中，定位到**输出实体**栏。
- 4 从**输出实体**列表中选择**相邻边界**。
- 5 右键单击**显式 7**并选择**重命名**。
- 6 在**重命名“显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入“导体边界”。
- 7 单击**确定**。

添加材料

- 1 在**主屏幕**工具栏中，单击**添加材料**以打开**添加材料**窗口。
- 2 转到**添加材料**窗口。
- 3 在模型树中选择 **AC/DC>Copper**。
- 4 单击窗口工具栏中的**添加到组件**。
- 5 在**主屏幕**工具栏中，单击**添加材料**以关闭**添加材料**窗口。

材料

Copper 1 (mat4)

- 1 在**材料**的**设置**窗口中，定位到**几何实体选择**栏。
- 2 从**几何实体**层列表中选择**边界**。
- 3 从**选择**列表中选择**导体边界**。

磁场 (MF)

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，单击**磁场 (mf)**。
- 2 在**磁场**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**不含无限元的非导体**。

阻抗边界条件 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边界**，然后选择**阻抗边界条件**。
- 2 在**阻抗边界条件**的**设置**窗口中，定位到**边界选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**导体边界**。

线圈 1

线圈特征不再施加在激活的域，它不再有影响。禁用它以便更简洁。

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 磁场 (mf)**节点下，右键单击**线圈 1**并选择**禁用**。
因为没有外部反馈的额外信息，高频时不好定义电压的量值，为了提供缺失的信息，使用**集总端口**边界特征来激励系统。

集总端口 1

- 1 在物理场工具栏中单击边界，然后选择集总端口。
- 2 选择“边界” 59-62。
输入边界的几何参数。
- 3 在集总端口的设置窗口中，定位到集总端口属性栏。
- 4 从集总端口类型列表中选择用户定义。
- 5 在 h_{port} 文本框中键入 “0.024”。
- 6 在 w_{port} 文本框中键入 “0.046”。
- 7 将 \mathbf{a}_h 矢量指定为

1	x
0	y
0	z

- 8 从终端类型列表中选择电流。

除了在铜导体表面上的损耗外，由于涡流，铁芯中也存在损耗。这些损耗可以通过指定铁芯中磁铁的有效复磁导率来引入，通常制造商可以提供这些数据，往往是特定的本构关系。

安培定律 2

- 1 在物理场工具栏中单击域，然后选择安培定律。
- 2 在安培定律的设置窗口中，定位到域选择栏。
- 3 从选择列表中选择铁芯。
- 4 定位到磁场栏。从本构关系列表中选择磁损耗。
- 5 从 μ' 列表中选择用户定义。从 μ'' 列表中选择用户定义。在 μ' 文本框中键入 “1200”。
- 6 在 μ'' 文本框中键入 “100”。

研究 2

步骤 1：频域

设置一个参数扫描，在 1 MHz 到 10MHz 的范围内，每隔 0.25 MHz 求解。

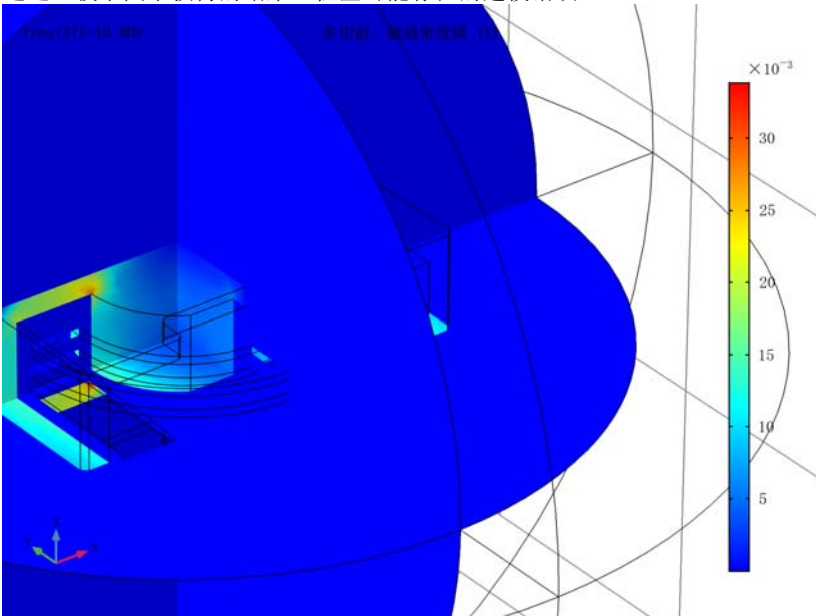
- 1 在模型开发器窗口的研究 2 节点下，单击步骤 1：频域。
- 2 在频域的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 3 从频率单位列表中选择 MHz。
- 4 单击范围。

- 5 在**范围**对话框中，在**起始**文本框中键入“1”。
- 6 在**停止**文本框中键入“10”。
- 7 在**步长**文本框中键入“0.25”。
- 8 单击**替换**。
- 9 在**主屏幕**工具栏中单击**计算**。

结果

磁通密度模 (mf) 1

通过比较下图中获得的结果，检查可能存在的建模错误。



继续，观察绕组的表面电流分布。

研究 2/ 解 3 (6) (sol3)

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果>数据集**节点下，右键单击**研究 2/解 3 (sol3)**并选择**生成副本**。
- 2 右键单击**研究 2/ 解 3 (6) (sol3)** 并选择**选择**。

选择

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果>数据集>研究 2/ 解 3 (6) (sol3)** 节点下，单击**选择**。
- 2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**几何实体选择**栏。
- 3 从**几何实体**层列表中选择**边界**。

- 4 从选择列表中选择导体边界。

三维绘图组 4

- 1 在主屏幕工具栏中单击添加绘图组，然后选择三维绘图组。
- 2 在三维绘图组的设置窗口中，定位到数据栏。
- 3 从数据集列表中选择研究 2/ 解 3 (6) (sol3)。
- 4 从参数值 (freq (MHz)) 列表中选择 1。

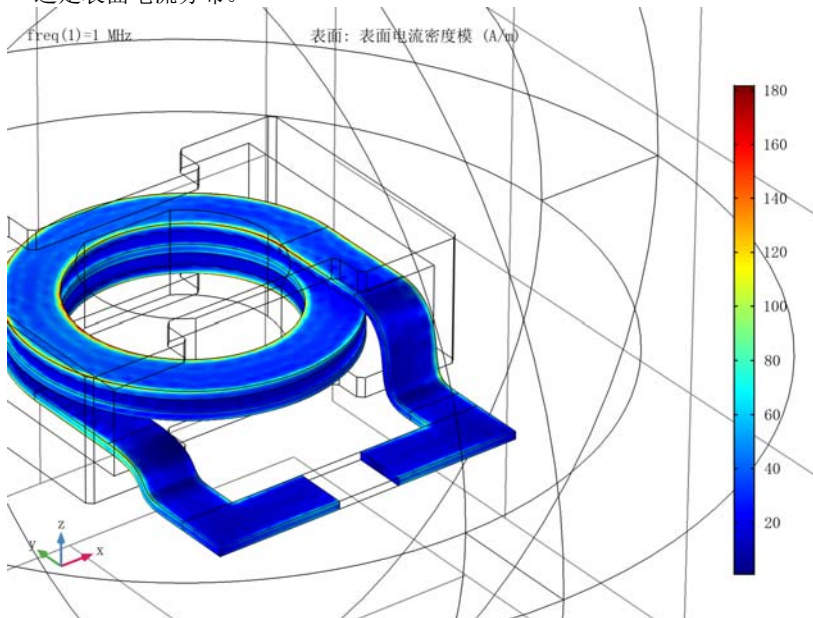
表面 1

- 1 右键单击三维绘图组 4 并选择表面。
- 2 在表面的设置窗口中，单击表达式栏右上角的替换表达式。从菜单中选择模型 > 组件 1 > 磁场 > 电流和电荷 > mf.normJs - 表面电流密度模 - A/m。

三维绘图组 4

- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，单击三维绘图组 4。
- 2 在三维绘图组 4 工具栏中单击绘制。

这是表面电流分布。



绘制线圈阻抗的实部和虚部，完成建模会话。

一维绘图组 5

- 1 在主屏幕工具栏中单击添加绘图组，然后选择一维绘图组。

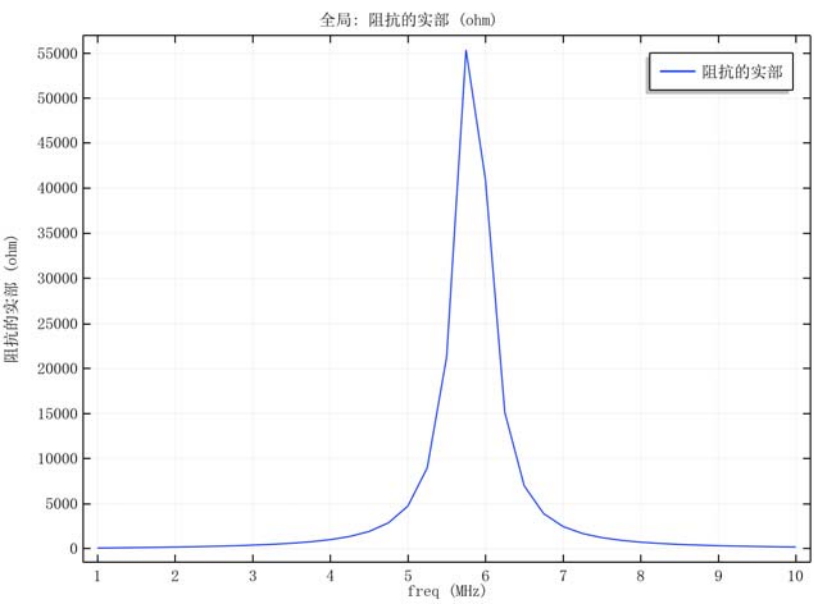
- 2 在一维绘图组的设置窗口中，定位到数据栏。
- 3 从数据集列表中选择研究 2/ 解 3 (5) (sol3)。

全局 1

- 1 右键单击一维绘图组 5 并选择全局。
- 2 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。从菜单中选择模型 > 组件 1> 磁场 > 端口 >mf.Zport_1 - 集总端口阻抗。
- 3 定位到 y 轴数据栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
real(mf.Zport_1)	ohm	阻抗的实部

- 4 在一维绘图组 5 工具栏中单击绘制。



线圈阻抗的电阻部分在谐振频率达到峰值。

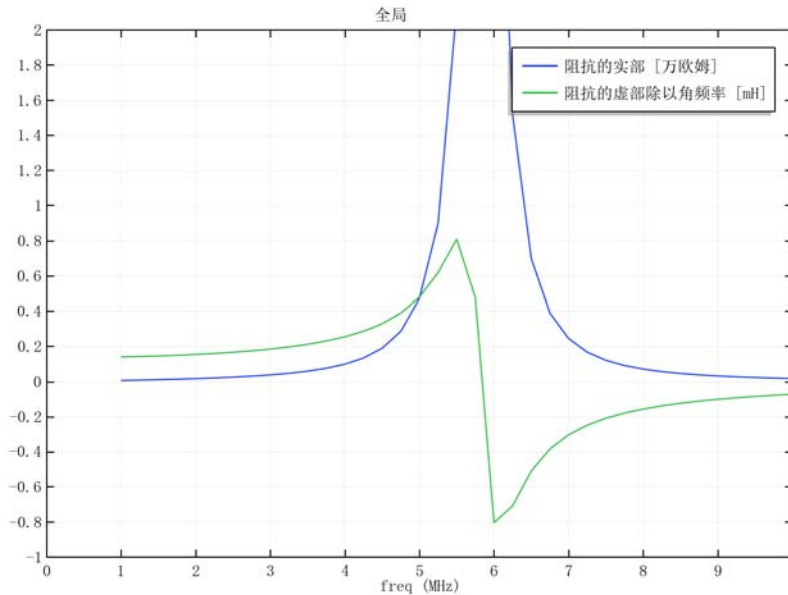
- 5 单击 y 轴数据栏右上角的替换表达式。从菜单中选择模型 > 组件 1> 磁场 > 端口 > mf.Zport_1 - 集总端口阻抗。

6 定位到 **y 轴数据** 栏。在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
$\text{real}(\text{mf.Zport_1})/10[\text{kohm}]$	1	阻抗的实部 [万欧姆]
$\text{real}(\text{mf.Zport_1}/\text{mf.iomega})$	mH	阻抗的虚部除以角频率 [mH]

一维绘图组 5

- 1 在模型开发者窗口的**结果**节点下，单击**一维绘图组 5**。
- 2 在一维绘图组的**设置**窗口中，定位到**轴**栏。
- 3 选中**手动轴限制**复选框。
- 4 在 **x 最小值** 文本框中键入 “0”。
- 5 在 **x 最大值** 文本框中键入 “10”。
- 6 在 **y 最小值** 文本框中键入 “-1”。
- 7 在 **y 最大值** 文本框中键入 “2”。
- 8 在一维绘图组 5 工具栏中单击**绘制**。



低频时估算的线圈阻抗的电抗接近静态电感值。随着频率增加，该数值也随着增加，当频率高于谐振频率后，线圈阻抗的电抗值由正值变为负值，即从电感性变为电容性，位移电流垂直于线圈绕组流动。

在保存 App 之前，指定一个绘图作为 App 的缩略图。