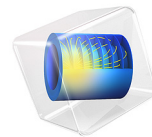


在 COMSOL Multiphysics 5.4 版本中创建



E 磁芯变压器

简介

变压器是用于电力传输的电气元件。大多数变压器的工作原理是电磁感应。典型变压器由初级线圈、次级线圈和铁芯组成。初级线圈是输入端，交流信号通过初级线圈输入。由于互感作用，次级线圈会产生感应电势，输出电压信号。铁芯能够将磁场限制在其中，从而将磁泄露降低到最小。

商业变压器使用多种类型的铁芯，这些铁芯根据其几何形状来命名，例如，I 形铁芯、U 形铁芯、壶形铁芯、环形铁芯和平面铁芯。本 App 使用一对 E 磁芯来限制磁通量。

本示例演示如何执行单相 E 磁芯变压器的瞬态仿真。此模型考虑软铁芯的非线性 B-H 曲线，计算磁场和电场的空间分布、磁饱和效应、瞬态响应以及对周围环境的磁漏情况。模拟了两个不同版本的变压器：第一种匝数比为 1，第二种的匝数比为 1000。

模型定义

这里考虑的单相 E 磁芯变压器的铁芯由一对 E 磁芯组成，铁芯形成一个封闭的磁路。变压器中的初级线圈和次级线圈围绕铁芯中央的腿放置，如图 1 中所示。

包含饱和效应的非线性 B-H 曲线用于模拟软铁芯的磁性能。铁芯中的磁滞效应忽略不计。本模型假设初级绕组和次级绕组由细导线组成，并且匝数很多。假设线径小于集肤深度且匝数很多，使用“线圈”特征来模拟这些绕组。此外，本模型不考虑各个线

圈中的涡流。初级绕组连接到初级电阻 R_p 和交流电压源 V_{ac} ，次级绕组连接到二次负载电阻 R_s ，如图 2 中所示。

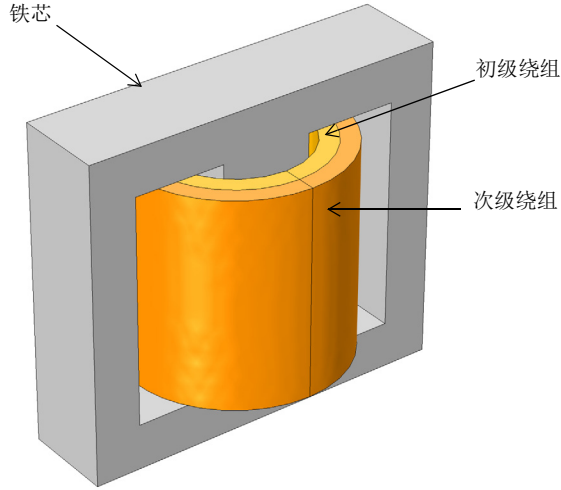


图1: E 磁芯变压器的模型图示。

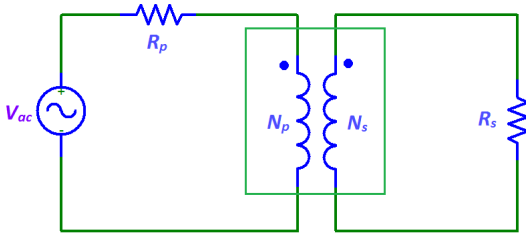


图2: 变压器连接至外电路，外电路包含电源和电阻。

本模型在线路频率为 50 Hz 的时域中求解。建模时，对输入电压的大小、线路频率、线圈匝数以及线圈电阻等多个重要的设计参数进行参数化，从而可以方便地更改。

变压器根据法拉第电磁感应定律原则工作，该定律表明线圈中的感应电压 (V_{in}) 与线圈中的磁通变化率 (ϕ) 和线圈匝数 (N) 成正比，如方程 1 中所示。

$$V_{in} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

如果两个线圈耦合，[方程 1](#) 可用于推断次级线圈中的感应电压电压 (V_s) 与初级线圈中的感应电压 (V_p) 成正比：

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (2)$$

这里的 N_s 和 N_p 分别是次级线圈和初级线圈中的线圈匝数。 N_p/N_s 称为匝数比。

结果与讨论

[图 3](#) 显示磁通密度模分布的曲面图和 $t = 50$ ms 时绕组中电流的箭头图。

[图 4](#) 显示 $t = 50$ ms 时铁芯中磁通密度模的箭头图。

[图 5](#) 和 [图 6](#) 分别显示初级绕组和次级绕组中的感应电压。由于每个绕组的匝数相同，因此这两个绕组中的感应电压都与[方程 2](#) 给定的电压相同。

流经初级绕组和次级绕组的电流分别显示在[图 7](#) 和 [图 8](#) 中。

[图 9](#) 显示的是匝数比 $N_p/N_s = 1000$ 且电源电压为 25 kV 时降压变压器的初级绕组中的感应电压。

最后，降压变压器的次级绕组中的感应电压显示在[图 10](#) 中。与[图 9](#) 的初级绕组中的电压相比，这个感应电压小 1000 倍。

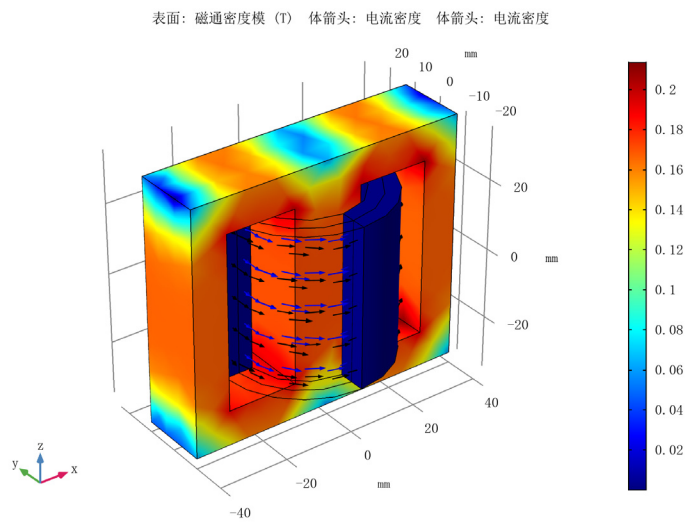


图3: $t = 50\text{ms}$ 时的磁通密度模和绕组中的电流。

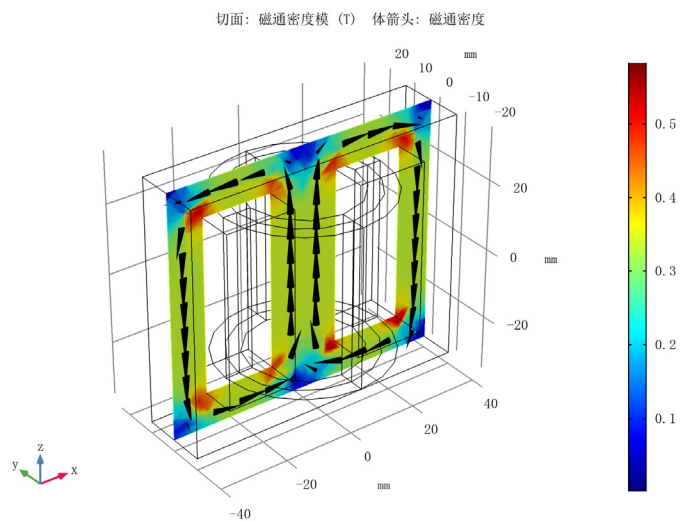


图4: $t = 50\text{ms}$ 时变压器铁芯中的磁通密度。

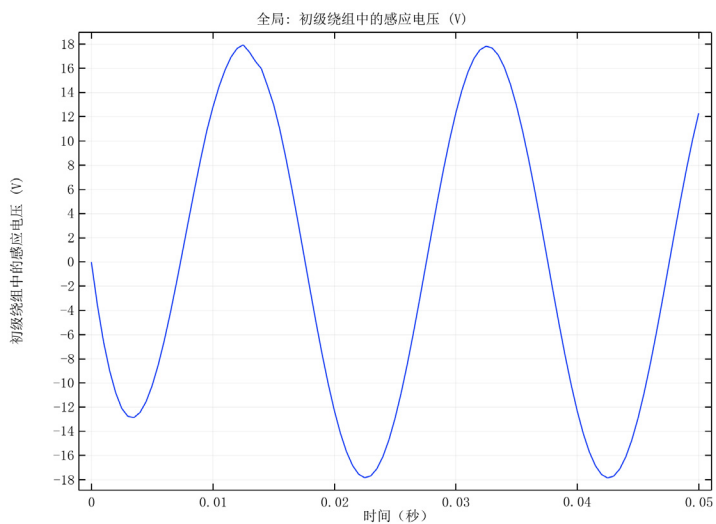


图5：初级绕组中的感应电压随时间的变化情况。

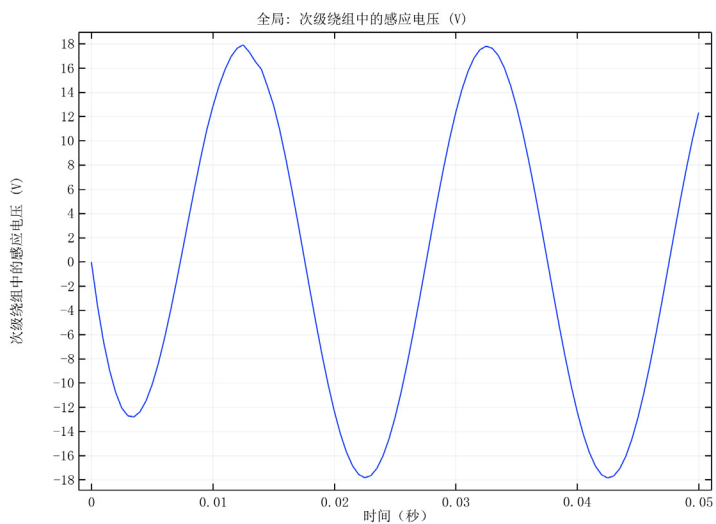


图6：次级绕组中的感应电压随时间的变化情况。

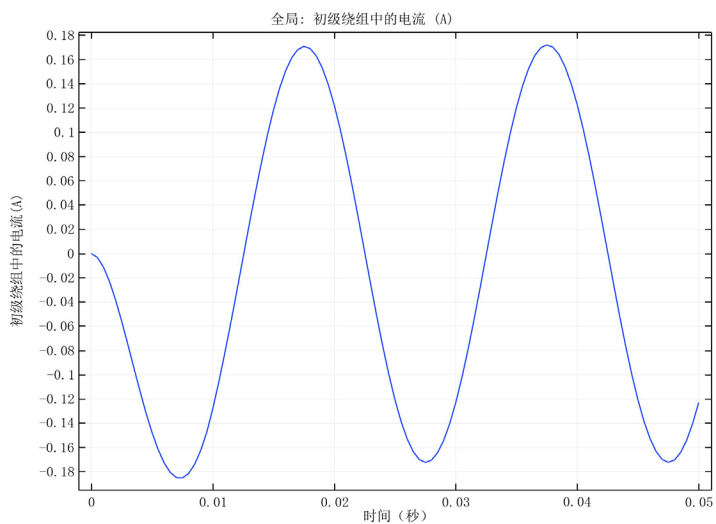


图7：初级绕组中的电流随时间的变化情况。

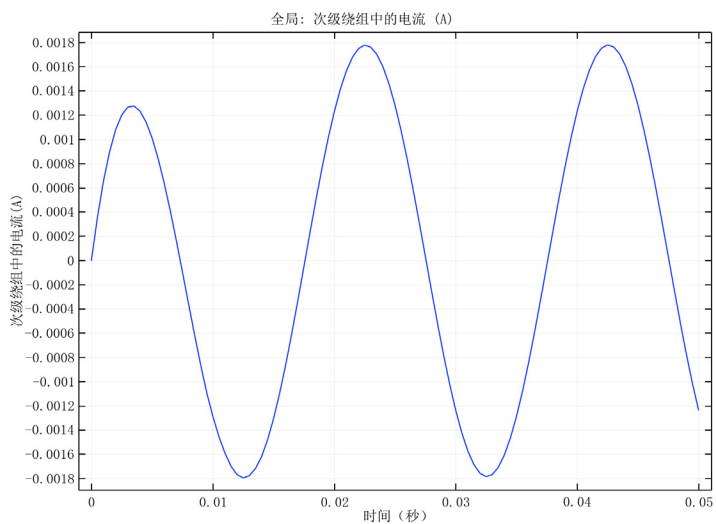


图8：次级绕组中的电流随时间的变化情况。

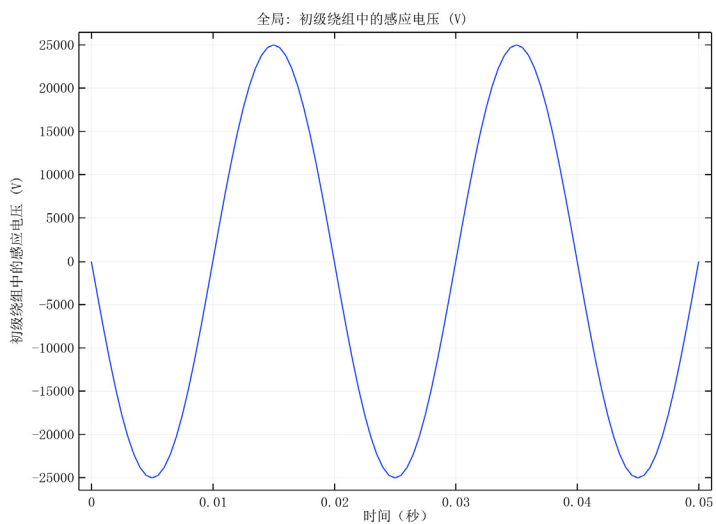


图9：降压变压器的初级绕组中的感应电压随时间的变化情况。

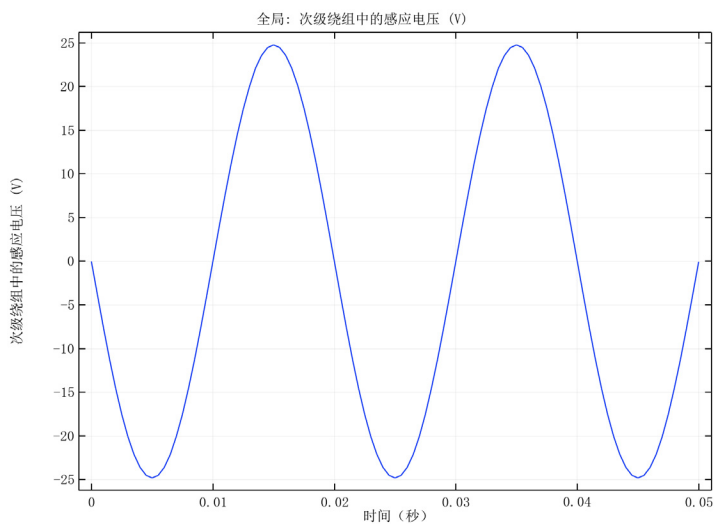


图10：降压变压器的次级绕组中的感应电压随时间的变化情况。

COMSOL 实施注意事项

使用“磁场”接口建模变压器的磁场。使用“线圈”特征建模初级和次级绕组。使用“电路”接口将初级和次级绕组连接到带有交流电压电源和电阻的外电路。添加“线圈几何分析”研究步骤来计算线圈中的电流。执行“瞬态”研究来确定初级和次级绕组中的电压和电流。

案例库路径：ACDC_Module/Other_Industrial_Applications/ecore_transformer

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**选择物理场树**中选择 **AC/DC> 电路 (cir)**。
- 5 单击**添加**。
- 6 单击**研究**。
- 7 在**选择研究树**中选择一些物理场接口的预设研究 > **线圈几何分析**。
- 8 单击**完成**。

全局定义

定义所需的全部参数。

- 1 在**模型开发器**窗口的**全局定义**节点下，单击**参数 1**。
- 2 在**参数**的**设置**窗口中，定位到**参数**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	值	描述
Rp	100[ohm]	100 W	初级绕组电阻
Rs	10[kohm]	10000 W	次级绕组电阻
Np	300	300	初级绕组中的匝数
Ns	300	300	次级绕组中的匝数
nu	50[Hz]	50 Hz	电源电压的频率
Vac	25[V]	25 V	电源电压

几何 1

从 `ecore_transformer_geom_sequence.mph` 文件插入几何序列。

- 1 在几何工具栏中单击**插入序列**。
- 2 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 `ecore_transformer_geom_sequence.mph`。

拉伸 1 (ext1)

为磁芯和绕组定义域和边界选择。首先，为磁芯域创建一个选择。

- 1 在模型开发器窗口的**组件 1 (comp1)**> **几何 1** 节点下，单击**拉伸 1 (ext1)**。
- 2 在**拉伸**的设置窗口中，定位到**结果实体的选择**栏。
- 3 找到**累积选择**子栏。单击**新建**。
- 4 在**新建累积选择**对话框中，在名称文本框中键入“磁芯”。
- 5 单击**确定**。

为初级绕组指定一个选择。

显式选择 1 (sel1)

- 1 在几何工具栏中单击**选择**，然后选择**显式选择**。
- 2 在**显式选择**的设置窗口中，在**标签**文本框中键入“初级绕组”。
- 3 在对象 **fin** 中，选择“域”5、6、8 和 9。
- 4 定位到**产生的选择**栏。找到**累积选择**子栏。单击**新建**。
- 5 在**新建累积选择**对话框中，在名称文本框中键入“绕组”。
- 6 单击**确定**。

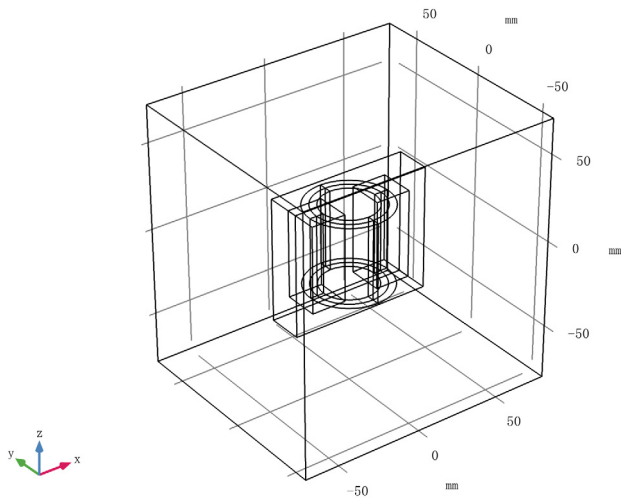
为次级绕组添加一个选择。

显式选择 2 (sel2)

- 1 在几何工具栏中单击**选择**，然后选择**显式选择**。
- 2 在对象 **fin** 中，选择“域”3、4、7 和 10。
- 3 在**显式选择**的设置窗口中，定位到**产生的选择**栏。
- 4 找到**累积选择**子栏。从**贡献**列表中选择**绕组**。
- 5 在**标签**文本框中键入“次级绕组”。

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。
选择线框渲染可以更清晰地观察内部结构。
- 3 在图形工具栏中单击**线框渲染**按钮。



几何外观如上图所示。

定义

现在，设置磁场的物理场。先隐藏外部边界，仅对变压器铁芯和绕组中的结果可视化。

视图 1

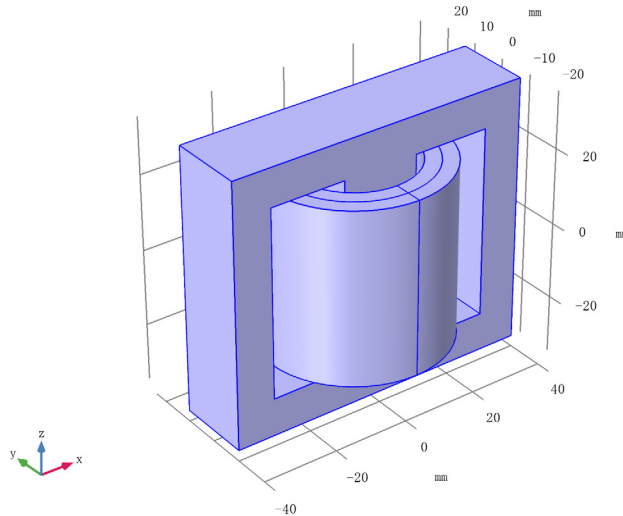
在**模型开发器**窗口中展开**组件 1 (comp1)**> **定义节点**。

对物理场隐藏 1

- 1 右键单击**视图 1** 并选择**对物理场隐藏**。

- 2 在对物理场隐藏的**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 选择“边界” 1–5 和 56。

磁场 (MF)



选择线性矢量单元来离散矢量磁势，这将提高模型的计算效率。一般来说，建议使用默认的二次单元。

- 1 在**模型开发者**窗口中，单击**磁场 (mf)**。
- 2 在**磁场的设置**窗口中，单击以展开**离散化**栏。
- 3 从**矢量磁势**列表中选择**线性单元**。

在磁芯和空气域中应用**安培定律**。

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**磁芯**。
- 4 定位到**磁场**栏。从**本构关系**列表中选择 **B-H 曲线**。

添加**线圈**特征以使用**均匀多匝**导线模型来建模初级和次级绕组。

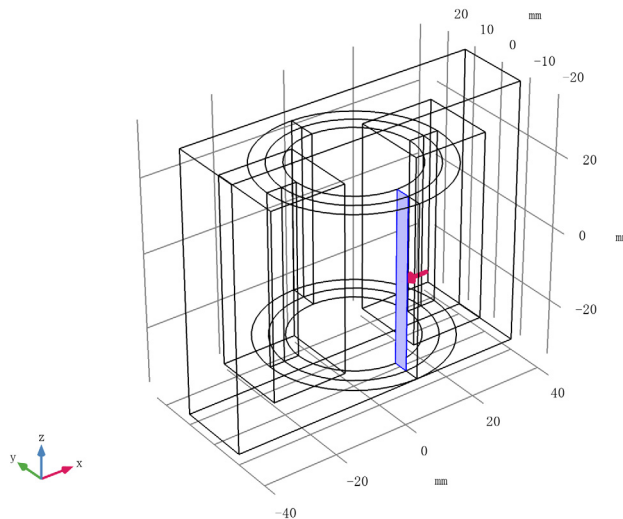
线圈 1

- 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 从选择列表中选择初级绕组。
- 4 定位到线圈栏。从导线模型列表中选择均匀多匝。
- 5 从线圈类型列表中选择数值。
- 6 定位到均匀多匝导线栏。在 N 文本框中键入 “ N_p ”。
- 7 定位到线圈栏。从线圈激励列表中选择电路（电流）。
- 8 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” 35。



线圈 2

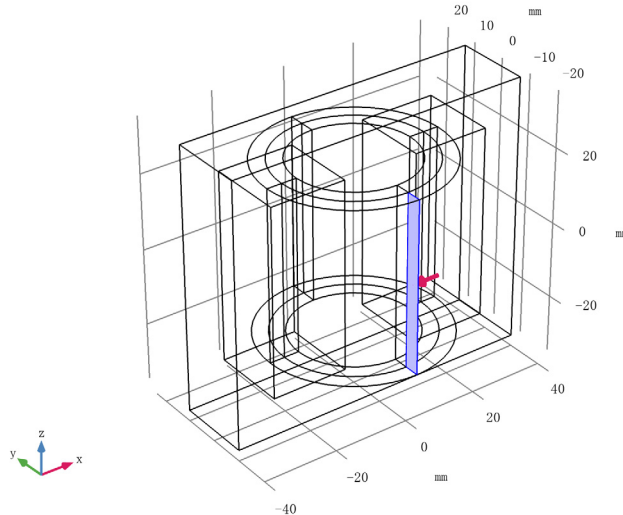
- 1 在物理场工具栏中单击域，然后选择线圈。
- 2 在线圈的设置窗口中，定位到域选择栏。
- 3 从选择列表中选择次级绕组。
- 4 定位到线圈栏。从导线模型列表中选择均匀多匝。
- 5 从线圈类型列表中选择数值。
- 6 定位到均匀多匝导线栏。在 N 文本框中键入 “ N_s ”。
- 7 定位到线圈栏。从线圈激励列表中选择电路（电流）。

8 在**模型开发器**窗口中展开**线圈 2**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 2>几何分析 1**节点，然后单击**输入 1**。

2 选择“**边界**” 31。



矢量磁势度规修复 1

在**物理场**工具栏中单击**域**，然后选择**矢量磁势度规修复**。

必须在**磁场**已激活的所有域应用度规修复。

电路 (CIR)

将外电路元件添加到变压器的初级绕组和次级绕组，如图 2 所示。

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，单击**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
p	1
n	0

4 定位到**装置参数**栏。从**源类型**列表中选择**正弦源**。

5 在 V_{src} 文本框中键入 “Vac”。

6 在 f 文本框中键入 “nu”。

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**节点连接**栏。

3 在表中输入以下设置:

标签	节点名称
p	2
n	1

4 定位到**外部设备**栏。从 V 列表中选择**线圈电压 (mf/coil1)**。

电阻 R 1

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	0
n	2

4 定位到**装置参数**栏。在 R 文本框中键入 “Rp”。

外部 I vs. U 2

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**节点连接**栏。

3 在表中输入以下设置:

标签	节点名称
p	3
n	0

4 定位到**外部设备**栏。从 *V* 列表中选择**线圈电压 (mf/coil2)**。

电阻 R2

- 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	0
n	3

4 定位到**装置参数**栏。在 *R* 文本框中键入 “Rs”。

为模型指派材料。先为所有域指定空气。

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**内置材料 > Air**。
- 4 单击窗口工具栏中的**添加到组件**。

材料

Air (mat1)

然后，为磁芯指派 soft iron (without losses) 材料，将电导率值修改为 10 S/m。

添加材料

- 1 转到**添加材料**窗口。
- 2 在模型树中选择 **AC/DC>Soft Iron (Without Losses)**。
- 3 单击窗口工具栏中的**添加到组件**。
- 4 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

Soft Iron (Without Losses) (mat2)

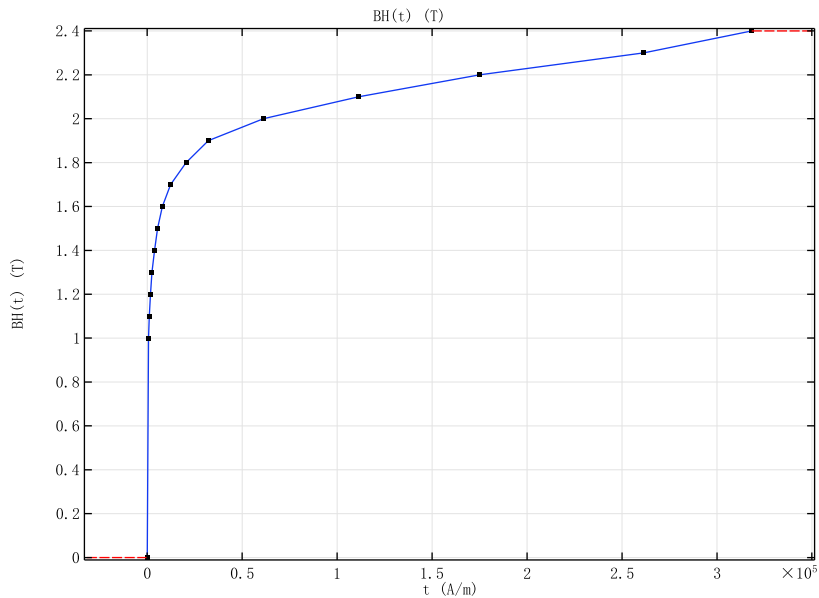
- 1 在材料的设置窗口中，定位到几何实体选择栏。
- 2 从选择列表中选择磁芯。

通过以下步骤对软铁的非线性 B-H 曲线可视化。

- 3 在模型开发器窗口中展开 **Soft Iron (Without Losses) (mat2)** 节点。

Interpolation 1 (BH, BH_inv, BH_prim)

- 1 在模型开发器窗口中展开组件 1 (comp1) > 材料 > Soft Iron (Without Losses) (mat2) > B-H Curve (BHCurve) 节点，然后单击 Interpolation 1 (BH, BH_inv, BH_prim)。
- 2 在插值的设置窗口中，定位到内插和外推栏。
- 3 从外推列表中选择常数。
- 4 单击绘制。



网格 1

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) 节点下，单击网格 1。
- 2 在网格的设置窗口中，定位到物理场控制网格栏。
- 3 从单元大小列表中选择超粗化。

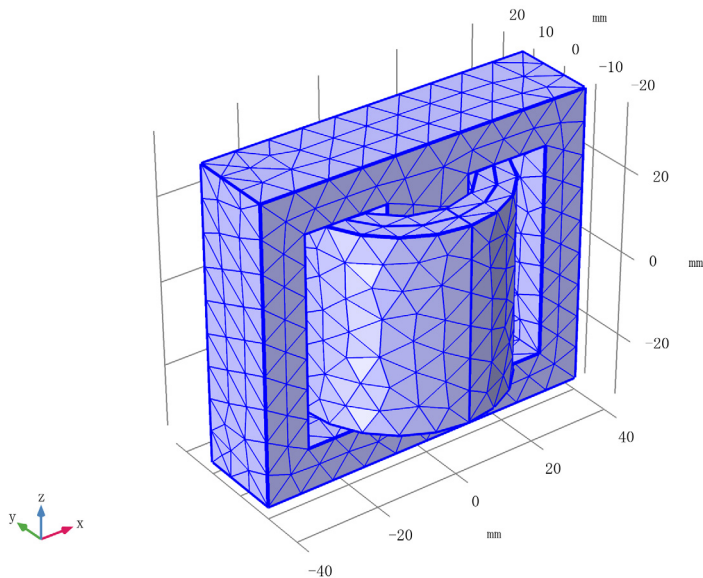
自由四面体网格 1

- 1 右键单击**组件 1 (comp1)**> **网格 1** 并选择**自由四面体网格**。
- 2 在**自由四面体网格**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。
- 3 从**几何实体**层列表中选择**整个几何**。

大小 1

- 1 右键单击**组件 1 (comp1)**> **网格 1**> **自由四面体网格 1** 并选择**大小**。
- 2 在**大小**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 单击**粘贴选择**。
- 5 在**粘贴选择**对话框中，在**选择**文本框中键入“2-10”。
- 6 单击**确定**。
- 7 在**大小**的**设置**窗口中，定位到**单元大小**栏。
- 8 单击**定制**按钮。
- 9 定位到**单元大小**参数栏。选中**最大单元大小**复选框。
- 10 在**关联**文本框中键入“8”。

11 单击**全部构建**。



通过单击**查看未隐藏的对象**按钮调整隐藏设置后，网格外观应如下图所示。这里的粗化网格用于快速求解模型。为了实现真实仿真，建议使用较细化网格。

研究 1

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 1**。
- 2 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。
- 3 清除**生成默认绘图复选框**。

为接下来的瞬态研究所必需的初级和次级绕组的几何分析求解**线圈几何分析**研究步骤。

- 4 在**主屏幕**工具栏中单击**计算**。

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**子栏。在**选择研究树**中选择**一般研究 > 瞬态**。
- 4 单击窗口工具栏中的**添加研究**。
- 5 在**主屏幕**工具栏中，单击**添加研究**以关闭**添加研究**窗口。

研究 2

- 1 在研究的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 2 清除生成默认绘图复选框。

步骤 1：瞬态

求解 0 到 50 毫秒的时域中的问题。

- 1 在模型开发器窗口的研究 2 节点下，单击步骤 1：瞬态。
- 2 在瞬态的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 3 在时间步文本框中键入 “range(0,5e-4,0.05)”。
- 4 单击以展开因变量值栏。按照下面给定的步骤来调节求解器。为了在大型瞬态模型中使用现实的非线性 B-H 曲线，有必要进行这种调节。由于方程具有非线性，因此求解器需要足够强大才能处理此类非线性问题。此外，由于磁场问题仅仅包含电导率为空（空气和叠片铁芯）中的安培定律节点，以及描述均质多匝导体的线圈节点，因此可以等效且更加提高计算效率的强制磁场方程为稳态。为了使用这种策略，需从前序研究步骤中调用未求解的物理量来求解瞬态研究。缺少这些，瞬态研究将无法运行，因为电流方向未知。还需要注意的是，当方程形式设置为稳态时，不能启动几何分析研究步骤，因为这将被解释为稳态研究。这就是为什么在这个模型中需要一个独立的研究来求解线圈几何分析，而不是后面紧接瞬态研究的原因。
- 5 找到不求解的变量值子栏。从设置列表中选择用户控制。
- 6 从方法列表中选择解。
- 7 从研究列表中选择研究 1, 线圈几何分析。
- 8 在研究工具栏中单击显示默认求解器。

磁场 (MF)

在物理场工具栏中单击电路 (cir)，然后选择磁场 (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，单击以展开方程栏。
- 3 从方程形式列表中选择稳态。

研究 2

解 2 (sol2)

- 1 在模型开发器窗口中展开解 2 (sol2) 节点。
- 2 在模型开发器窗口的研究 2> 求解器配置> 解 2 (sol2) 节点下，单击瞬态求解器 1。
- 3 在瞬态求解器的设置窗口中，单击以展开时间步进栏。
- 4 从求解器采用的步长列表中选择中级。

- 5 找到代数变量设置子栏。从误差估计列表中选择排除代数。
- 6 在模型开发器窗口的研究 2> 求解器配置> 解 2 (sol2)> 瞬态求解器 1 节点下，单击全耦合 1。
- 7 在全耦合的设置窗口中，定位到常规栏。
- 8 从线性求解器列表中选择直接。
- 9 单击以展开方法和终止栏。从雅可比矩阵更新列表中选择在每次迭代中。
- 10 在最大迭代次数文本框中键入“25”。
- 11 在模型开发器窗口的研究 2> 求解器配置> 解 2 (sol2)> 瞬态求解器 1 节点下，单击直接。
- 12 在直接的设置窗口中，定位到常规栏。
- 13 从求解器列表中选择 PARDISO。
- 14 在研究工具栏中单击计算。

结果

在模型开发器窗口中展开结果节点。

研究 2/ 解 2 (sol2)

使用以下步骤生成磁芯和线圈中磁通密度模的表面图和绕组中电流的箭头图，应如图 3 所示。由于次级绕组比初级绕组中的电流小得多，将会使用两个单独的箭头图（尺度不同）。

- 1 在模型开发器窗口中展开结果> 数据集节点。
- 2 右键单击研究 2/ 解 2 (sol2) 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 2 (sol2) 节点下，单击选择。
- 2 在选择设置窗口中，定位到几何实体选择栏。
- 3 从几何实体层列表中选择域。
- 4 选择“域”2-10。

三维绘图组 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 2 (sol2)。
- 4 在图形工具栏中单击缩放到窗口大小按钮。

选择 1

- 1 右键单击**三维绘图组 1**并选择**表面**。
- 2 在**模型开发器**窗口的**结果 > 三维绘图组 1**节点下，右键单击**表面 1**并选择**选择**。
- 3 选择“边界”6-14、16、18、20、21、23、25、27和29-55。

体箭头 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 1**并选择**体箭头**。
- 2 在**体箭头**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.Jx,mf.Jy,mf.Jz - 电流密度**。
- 3 定位到**箭头位置**栏。找到**X 栅格子**栏。在点文本框中键入“10”。
- 4 找到**Y 栅格子**栏。在点文本框中键入“10”。
- 5 找到**Z 栅格子**栏。在点文本框中键入“5”。
- 6 定位到**着色和样式**栏。从**颜色**列表中选择**蓝色**。
- 7 选中**比例因子**复选框。
- 8 在**关联**文本框中键入“ $2.5e-5$ ”。

选择 1

- 1 右键单击**结果 > 三维绘图组 1 > 体箭头 1**并选择**选择**。
- 2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**初级绕组**。

体箭头 2

- 1 右键单击**体箭头 1**并选择**生成副本**。
- 2 在**体箭头**的**设置**窗口中，定位到**着色和样式**栏。
- 3 从**颜色**列表中选择**黑色**。
- 4 在**比例因子**文本框中键入“0.0025”。

选择 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**体箭头 2**节点，然后单击**选择 1**。
- 2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**次级绕组**。
- 4 在**图形**工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮。
- 5 在**三维绘图组 1**工具栏中单击**绘制**。

按照下列步骤操作来重现如图 4 中所示的磁通密度模。

三维绘图组 2

- 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 2 (sol2)**。

切面 1

- 1 右键单击**三维绘图组 2**并选择**切面**。
- 2 在**切面**的**设置**窗口中，定位到**平面数据**栏。
- 3 从**平面**列表中选择**ZX 平面**。
- 4 在**平面数**文本框中键入“1”。

选择 1

- 1 右键单击**结果 > 三维绘图组 2 > 切面 1**并选择**选择**。
- 2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**磁芯**。

体箭头 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**体箭头**。
- 2 在**体箭头**的**设置**窗口中，定位到**箭头位置**栏。
- 3 找到**X 栅格子**栏。在**点**文本框中键入“10”。
- 4 找到**Y 栅格子**栏。在**点**文本框中键入“1”。
- 5 找到**Z 栅格子**栏。在**点**文本框中键入“10”。
- 6 定位到**着色和样式**栏。从**箭头类型**列表中选择**圆锥体**。
- 7 选中**比例因子**复选框。
- 8 在**关联**文本框中键入“30”。
- 9 从**颜色**列表中选择**黑色**。

选择 1

- 1 右键单击**结果 > 三维绘图组 2 > 体箭头 1**并选择**选择**。
- 2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**磁芯**。
- 4 在**三维绘图组 2**工具栏中单击**绘制**。

然后，绘制初级绕组中的感应电压。

一维绘图组 3

- 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 2 (sol2)。
- 4 右键单击一维绘图组 3 并选择重命名。
- 5 在重命名 “一维绘图组” 对话框中，在新标签文本框中键入 “初级绕组中的感应电压”。
- 6 单击确定。
- 7 在一维绘图组的设置窗口中，定位到绘图设置栏。
- 8 选中 x 轴标签复选框。
- 9 在关联文本框中键入 “时间（秒）”。
- 10 选中 y 轴标签复选框。
- 11 在关联文本框中键入 “初级绕组中的感应电压（V）”。

全局 1

- 1 右键单击初级绕组中的感应电压并选择全局。
- 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 > 线圈参数 > mf.VCoil_1 - 线圈电压。
- 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
mf.VCoil_1	V	初级绕组中的感应电压

- 4 单击以展开图例栏。清除显示图例复选框。
- 5 在初级绕组中的感应电压工具栏中单击绘制。
将绘制的图与图 5 进行比较。

绘制次级绕组中的感应电压，如图 6 所示。

一维绘图组 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 2 (sol2)。
- 4 右键单击一维绘图组 4 并选择重命名。
- 5 在重命名 “一维绘图组” 对话框中，在新标签文本框中键入 “次级绕组中的感应电压”。
- 6 单击确定。
- 7 在一维绘图组的设置窗口中，定位到绘图设置栏。

- 8 选中 **x 轴标签**复选框。
- 9 在关联文本框中键入 “时间（秒）”。
- 10 选中 **y 轴标签**复选框。
- 11 在关联文本框中键入 “次级绕组中的感应电压（V）”。

全局 1

- 1 右键单击**次级绕组中的感应电压**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 > 线圈参数 >mf.VCoil_2 - 线圈电压**。
- 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
mf.VCoil_2	V	次级绕组中的感应电压

- 4 定位到**图例**栏。清除**显示图例**复选框。
- 5 在**次级绕组中的感应电压**工具栏中单击**绘制**。

绘制初级绕组中的电流并与图 7 进行比较。

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 2 (sol2)**。
- 4 右键单击**一维绘图组 5**并选择**重命名**。
- 5 在**重命名 “一维绘图组”**对话框中，在**新标签**文本框中键入 “初级绕组中的电流”。
- 6 单击**确定**。
- 7 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**绘图设置**栏。
- 8 选中 **x 轴标签**复选框。
- 9 在关联文本框中键入 “时间（秒）”。
- 10 选中 **y 轴标签**复选框。
- 11 在关联文本框中键入 “初级绕组中的电流（A）”。

全局 1

- 1 右键单击**初级绕组中的电流**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 > 线圈参数 >mf.ICoil_1 - 线圈电流**。

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
mf.ICoil_1	A	初级绕组中的电流

4 定位到 **图例** 栏。清除 **显示图例** 复选框。

5 在 **初级绕组中的电流** 工具栏中单击 **绘制**。

然后，绘制次级绕组中的电流。

一维绘图组 6

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 2 (sol2)**。

4 右键单击 **一维绘图组 6** 并选择 **重命名**。

5 在 **重命名 “一维绘图组”** 对话框中，在 **新标签** 文本框中键入 “次级绕组中的电流”。

6 单击 **确定**。

7 在一维绘图组的设置窗口中，定位到 **绘图设置** 栏。

8 选中 **x 轴标签** 复选框。

9 在关联文本框中键入 “时间（秒）”。

10 选中 **y 轴标签** 复选框。

11 在关联文本框中键入 “次级绕组中的电流 (A)”。

全局 1

1 右键单击 **次级绕组中的电流** 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 > 线圈参数 > mf.ICoil_2 - 线圈电流**。

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
mf.ICoil_2	A	次级绕组中的电流

4 定位到 **图例** 栏。清除 **显示图例** 复选框。

5 在 **次级绕组中的电流** 工具栏中单击 **绘制**。

将该绘图与图 8 进行比较。

修改该模型以模拟匝数比为 1000 和 $R_p = R_s$ 的降压变压器。另外，将电源电压更改为 $V_s = 25\text{kV}$ 。

全局定义

- 1 在模型开发器窗口的全局定义节点下，单击参数 1。
- 2 在参数的设置窗口中，定位到参数栏。
- 3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	值	描述
Rs	100[ohm]	100 W	次级绕组电阻
Np	3e5	3E5	初级绕组中的匝数
Vac	25[kV]	25000 V	电源电压

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 找到研究子栏。在选择研究树中选择一般研究 > 瞬态。
- 4 单击窗口工具栏中的添加研究。
- 5 在主屏幕工具栏中，单击添加研究以关闭添加研究窗口。

研究 3

- 1 在研究的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 2 清除生成默认绘图复选框。

步骤 1：瞬态

- 1 在模型开发器窗口的研究 3 节点下，单击步骤 1：瞬态。
- 2 在瞬态的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 3 在时间步文本框中键入 “range(0,5e-4,0.05)”。
- 4 定位到因变量值栏。找到不求解的变量值子栏。从设置列表中选择用户控制。
- 5 从方法列表中选择解。
- 6 从研究列表中选择研究 1, 线圈几何分析。

将求解器调整为与前一个研究相似，除了上述的设置，为了能够更快地收敛，禁用了变量的自动缩放。因为这样将限制精度，所以对最大时间步进添加了额外的约束。

- 7 在研究工具栏中单击显示默认求解器。

解 3 (sol3)

- 1 在模型开发器窗口中展开解 3 (sol3) 节点。

- 2 在模型开发器窗口中展开研究 3> 求解器配置> 解 3 (sol3)> 瞬态求解器 1 节点，然后单击研究 3> 求解器配置> 解 3 (sol3)> 因变量 1。
- 3 在因变量的设置窗口中，定位到缩放栏。
- 4 从方法列表中选择无。
- 5 在模型开发器窗口的研究 3> 求解器配置> 解 3 (sol3) 节点下，单击瞬态求解器 1。
- 6 在瞬态求解器的设置窗口中，定位到时间步进栏。
- 7 从最大步长约束列表中选择常数。
- 8 在最大步长文本框中键入 “ $2.5e-4$ ”。
- 9 从求解器采用的步长列表中选择精确。
- 10 找到代数变量设置子栏。从误差估计列表中选择排除代数。
- 11 在模型开发器窗口的研究 3> 求解器配置> 解 3 (sol3)> 瞬态求解器 1 节点下，单击全耦合 1。
- 12 在全耦合的设置窗口中，定位到常规栏。
- 13 从线性求解器列表中选择直接。
- 14 定位到方法和终止栏。从雅可比矩阵更新列表中选择在每次迭代中。
- 15 在最大迭代次数文本框中键入 “25”。
- 16 在模型开发器窗口的研究 3> 求解器配置> 解 3 (sol3)> 瞬态求解器 1 节点下，单击直接。
- 17 在直接的设置窗口中，定位到常规栏。
- 18 从求解器列表中选择 PARDISO。
- 19 在研究工具栏中单击计算。

结果

绘制降压变压器的初级绕组中的感应电压。

一维绘图组 7

- 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 在模型开发器窗口中，右键单击一维绘图组 7 并选择重命名。
- 3 在重命名 “一维绘图组” 对话框中，在新标签文本框中键入 “初级绕组中的感应电压 - II”。
- 4 单击确定。
- 5 在一维绘图组的设置窗口中，定位到数据栏。
- 6 从数据集列表中选择研究 3/ 解 3 (sol3)。
- 7 定位到绘图设置栏。选中 x 轴标签复选框。

- 8 在关联文本框中键入 “时间（秒）”。
- 9 选中 **y 轴标签** 复选框。
- 10 在关联文本框中键入 “初级绕组中的感应电压（V）”。

全局 1

- 1 右键单击**初级绕组中的感应电压 -II** 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 > 线圈参数 > mf.VCoil_1 - 线圈电压**。
- 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
mf.VCoil_1	V	初级绕组中的感应电压

- 4 定位到**图例** 栏。清除**显示图例** 复选框。
- 5 在**初级绕组中的感应电压 -II** 工具栏中单击**绘制**。
将该绘图与图 9 进行比较。

最后，绘制降压变压器的次级绕组中的感应电压。

一维绘图组 8

- 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**模型开发器**窗口中，右键单击**一维绘图组 8** 并选择**重命名**。
- 3 在**重命名 “一维绘图组”** 对话框中，在**新标签**文本框中键入 “次级绕组中的感应电压 -II”。
- 4 单击**确定**。
- 5 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**数据** 栏。
- 6 从**数据集**列表中选择**研究 3/ 解 3 (sol3)**。
- 7 定位到**绘图设置** 栏。选中 **x 轴标签** 复选框。
- 8 在关联文本框中键入 “时间（秒）”。
- 9 选中 **y 轴标签** 复选框。
- 10 在关联文本框中键入 “次级绕组中的感应电压（V）”。

全局 1

- 1 右键单击**次级绕组中的感应电压 -II** 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 > 线圈参数 > mf.VCoil_2 - 线圈电压**。

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
mf.VCoil_2	V	次级绕组中的感应电压

4 定位到 **图例** 栏。清除 **显示图例** 复选框。

5 在 **次级绕组中的感应电压 -II** 工具栏中单击 **绘制**。

绘图应如 [图 10](#) 所示。