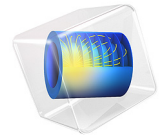


在 COMSOL Multiphysics 5.4 版本中创建



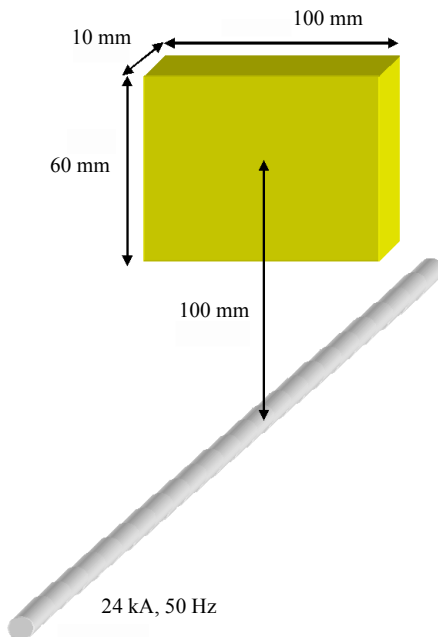
涡流

简介

在许多大功率交流应用中，感应涡流及相关的热负荷是一个非常受关注的问题。本例是一个典型模型，演示多个相关物理场以及适用于“AC/DC 模块”的建模技术。

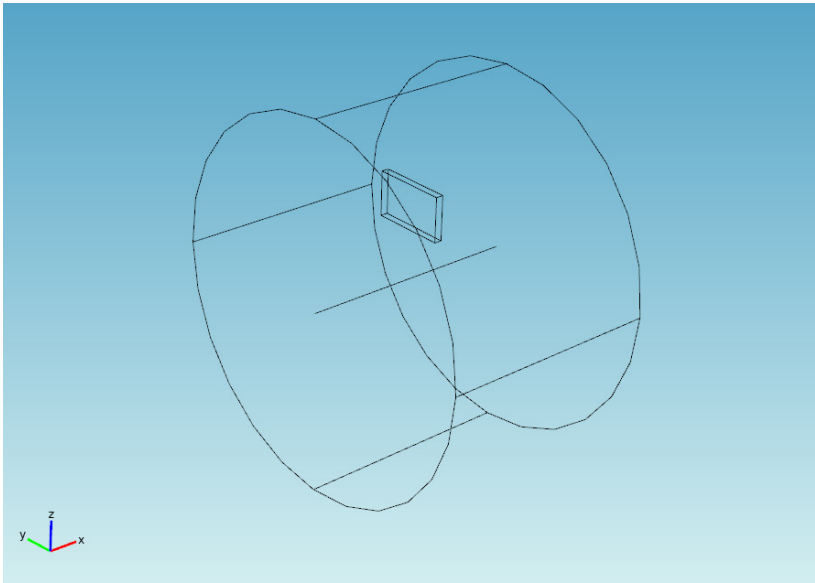
模型定义

一块金属板放置在 50 Hz 交流导体附近。板中产生的涡流分布取决于板的电导率和磁导率。这一讨论涉及四种不同的材料：铜、铝、不锈钢和磁铁。分步操作说明中主要描述了铜和铁。几何由一根导线及一块板组成，其尺寸如下所示。



因为无法对无限体积进行网格划分，所以需要指定一个有限体积以对其进行网格划分并求解。在本案例中，创建一个圆柱包围导线和板，并将导线置于圆柱轴上，这样做

比较有意义。使用默认的边界条件“磁绝缘”时，这是一个很好的选择。这一条件使场与外边界相切。对于圆柱形域，这是对实际情况的合理近似。



导体作为 0° 相位、有效 (RMS) 值为 24 kA 的线电流建模。

磁矢势根据以下公式进行计算

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}\right) = \mathbf{0}$$

其中 σ 是电导率， ε 是介电常数， μ 是磁导率。

涡流建模中的一个重要参数是集肤深度 δ 。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

下表列出频率为 50 Hz 时不同材料的集肤深度。

材料	相对磁导率	电导率	集肤深度
铜	1	$5.998 \cdot 10^7$ S/m	9 mm
铝	1	$3.774 \cdot 10^7$ S/m	12 mm

材料	相对磁导率	电导率	集肤深度
不锈钢	1	$1.137 \cdot 10^6 \text{ S/m}$	67 mm
铁	4000	$1.12 \cdot 10^7 \text{ S/m}$	0.34 mm

为了得到此模型的准确结果，网格必须能够解析金属中的渐逝场。实际上，这意味着需要使用至少 1 个单元以上的网格来解析集肤深度，最好是更接近于 2 个，甚至更多单元。此 App 对铜板使用了最大单元大小 5 mm。

当集肤深度小于导电物体的大小时，实际上几乎不可能解析集肤深度。这往往发生在高频时、大型结构中或存在较高电导率和磁导率的材料时。这几种情况需要另一种技术：将导电物体的内部从模型中排除，用阻抗边界条件来表征。这一条件本质上将集肤深度设为零，使所有感应电流都在导体表面流过。此边界上磁场和电场之间的数学关系式为：

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} + \sqrt{\frac{\varepsilon - j\sigma/\omega}{\mu}} \mathbf{n} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{n}) = \mathbf{0}$$

耗散功率密度 P_d （SI 单位：W/m²）可以根据以下表达式计算

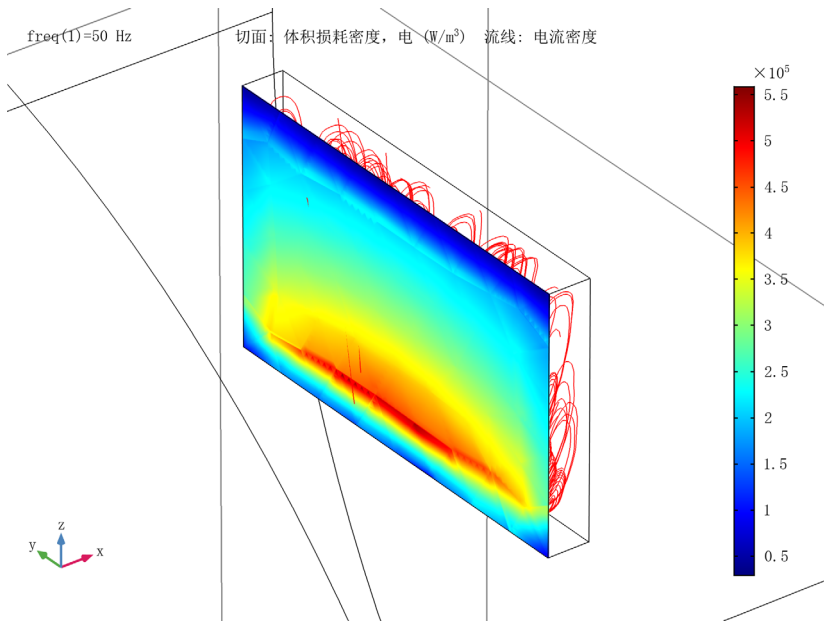
$$P_d = \frac{1}{2}(\mathbf{J}_S \cdot \mathbf{E}^*)$$

其中 \mathbf{J}_S 是感应表面电流密度，星号 (*) 表示共轭复数。

此模型中包含了铜模型中的板内部，并对磁铁使用了阻抗边界条件。

结果与讨论

铜板的感应涡流分布显示为流线，而欧姆损耗的分布显示为切面图。



通过对板积分得到总耗散功率为 6 W。如果对不同材料重复仿真，此 App 将表明降低电导率会降低耗散功率。但是，对于软铁等磁导率较高的材料，尽管电导率低得多，但耗散功率会高于铜 (27 W)。

案例库路径: ACDC_Module/Inductive_Devices_and_Coils/eddy_currents

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 单击**研究**。
- 5 在**选择研究**树中选择**一般研究 > 频域**。
- 6 单击**完成**。

几何 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**几何 1**。
- 2 在**几何**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。
- 3 从**长度单位**列表中选择 **mm**。

圆柱体 1 (cyl1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**圆柱体**。
- 2 在**圆柱体**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。
- 3 在**半径**文本框中键入 “250”。
- 4 在**高度**文本框中键入 “300”。
- 5 定位到**轴**栏。从**轴类型**列表中选择**笛卡尔**。
- 6 在 **x** 文本框中键入 “1”。
- 7 在 **z** 文本框中键入 “0”。

贝塞尔多边形 1 (bl1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**更多体素**，然后选择**贝塞尔多边形**。
- 2 在**贝塞尔多边形**的**设置**窗口中，定位到**多边形线段**栏。
- 3 找到**添加段子**栏。单击**添加线性多项式**。
- 4 找到**控制点子**栏。在 **2** 行中，将 **x** 设为 300。
- 5 找到**添加段子**栏。单击**添加线性多项式**。
- 6 找到**控制点子**栏。单击**封闭曲线**。

长方体 1 (blk1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**长方体**。
- 2 在**长方体**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。
- 3 在**宽度**文本框中键入 “10”。
- 4 在**深度**文本框中键入 “100”。
- 5 在**高度**文本框中键入 “60”。
- 6 定位到**位置**栏。在 **x** 文本框中键入 “145”。

- 7 在 **y** 文本框中键入 “-50”。
- 8 在 **z** 文本框中键入 “70”。
- 9 单击**构建所有对象**。
- 10 在**图形**工具栏中单击**透明**按钮。

模型几何现已完成。定义选择组，为仿真作准备。

定义

显式 1

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

显式 2

- 1 在**定义**工具栏中单击**显式**。
- 2 在**模型开发器**窗口中，右键单击**显式 2** 并选择**重命名**。
- 3 在**重命名 “显式”**对话框中，在**新标签**文本框中键入 “板边界”。
- 4 单击**确定**。
- 5 选择 “域” 2。
- 6 在**显式**的**设置**窗口中，定位到**输出实体**栏。
- 7 从**输出实体**列表中选择**相邻边界**。

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)

- 1 在**材料**的**设置**窗口中，定位到**材料属性明细**栏。

2 在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
电导率	σ_{iso} ; $\sigma_{mai i} = \sigma_{iso}$, $\sigma_{mai j} = 0$	100 [S/m]	S/m	Basic

请注意，这个较小的非零空气电导率不会对结果产生实质影响，但有助于求解器收敛。

接下来，用**铜**替代板域的材料**空气**。

添加材料

- 1 转到**添加材料**窗口。
- 2 在模型树中选择**内置材料 >Copper**。
- 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

Copper (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**板**。

磁场 (MF)

边电流 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边**，然后选择**边电流**。
- 2 选择“边”6。
- 3 在**边电流**的**设置**窗口中，定位到**边电流**栏。
- 4 在 I_0 文本框中键入 “ $\sqrt{2} * 24$ [kA]” 产生均方根电流 24 kA。

网格 1

为了在解析集肤深度的同时使网格计算量不至于太大，将铜板的网格划分得比其余部分几何更细化。请注意，需要在序列中先添加较细化网格；否则会在公共域边界上得到粗化网格，这将限制铜板域内的网格。

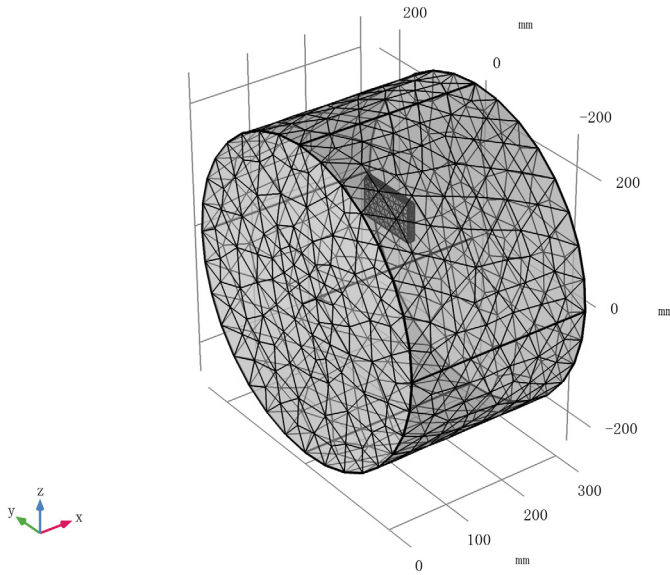
自由四面体网格 1

- 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**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域。
- 4 从选择列表中选择板。
- 5 单击以展开缩放几何栏。在 y 方向比例文本框中键入 “0.4”。
- 6 在 z 方向比例文本框中键入 “0.4”。

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，定位到单元大小栏。
- 3 单击定制按钮。
- 4 定位到单元大小参数栏。选中最大单元大小复选框。
- 5 在关联文本框中键入 “5”。
- 6 在模型开发器窗口中，右键单击网格 1 并选择自由四面体网格。
- 7 在网格的设置窗口中，单击全部构建。



研究 1

步骤 1: 频域

- 1 在模型开发器窗口的研究 1 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 在**频率**文本框中键入“50”。
- 4 在主屏幕工具栏中单击**计算**。

结果

磁通密度模 (mf)

默认绘图显示了三个横截面上的磁通密度模。以下操作说明介绍如何将铜板中的涡流和电阻热可视化。

多切面 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**磁通密度模 (mf)** 节点。
- 2 右键单击**多切面 1** 并选择**删除**单击是进行确认。

切面 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，右键单击**磁通密度模 (mf)** 并选择**切面**。
- 2 在**切面**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 > 发热和损耗 > mf.Qrh - 体积损耗密度, 电 - W/m³**。
- 3 定位到**平面数据**栏。从**定义方法**列表中选择**坐标**。
- 4 在**X 坐标**文本框中键入“145.1”。
- 5 在**磁通密度模 (mf)** 工具栏中单击**绘制**。
- 6 在**图形**工具栏中单击**透明**按钮这会使透明设置返回到其默认状态。

流线 1

- 1 右键单击**磁通密度模 (mf)** 并选择**流线**。
- 2 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 > 电流和电荷 > mf.Jx,mf.Jy,mf.Jz - 电流密度**。
- 3 定位到**流线定位**栏。从**定位**列表中选择**起点控制**。
- 4 在**点**文本框中键入“50”。
- 5 单击以展开**高级**栏。在**最大积分步长数**文本框中键入“200”这样可减小流线的长度。
- 6 在**磁通密度模 (mf)** 工具栏中单击**绘制**。

由于空气的非零电导率，空气域也将包含流线。创建一个选择，仅显示铜板中的流线。

研究 1/ 解 1 (sol1)

- 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 1/ 解 1 (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 (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 从选择列表中选择板。
对图形进行放大，更清晰地查看结果。
- 5 在图形工具栏中单击线框渲染按钮。
- 6 在图形工具栏中单击缩放到选择按钮。

磁通密度模 (mf)

最后一步，对铜中的电阻热求积分，计算总加热功率。

体积分 1

- 1 在结果工具栏中单击更多派生值，然后选择积分 > 体积分。
- 2 在体积分的设置窗口中，定位到选择栏。
- 3 从选择列表中选择板。
- 4 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 > 发热和损耗 > mf.Qrh - 体积损耗密度，电。
- 5 单击计算。

结果应接近 6 W。

如果要对铝或其他集肤深度在 1 cm 量级或更大的材料重复这一分析，只需更改板的材料并再次运行仿真。在本教程的其余部分，阻抗边界条件将用于计算磁铁的结果，其集肤深度远小于板的厚度。

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 从选择列表中选择手动。
- 4 选择“域”1。

移除板意味着不在板内求解任何方程。添加阻抗边界条件，切换到表面表达方式。

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 从选择列表中选择板边界。

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 > Iron**。
- 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

Iron (mat3)

- 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**板边界**。

研究 1

为了保留铜的仿真结果，在计算研究前禁用**求解器 1**。这样，COMSOL Multiphysics 将生成第二个求解器分支。

解 1 (sol1)

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**研究 1 > 求解器配置**节点。
- 2 右键单击**解 1 (sol1)**并选择**禁用**。
- 3 在主屏幕工具栏中单击**计算**。

结果

磁通密度模 (mf) 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**磁通密度模 (mf) 1**。
- 2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“表面损耗密度，电 (mf)”。

现在可在板表面上使用电阻热变量。您可以移除默认的多切面图，然后添加一个表面电阻热的表面图。

多切面 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**结果 > 表面损耗密度，电 (mf)**节点。
- 2 右键单击**多切面 1**并选择**删除**单击**是**进行确认。

表面 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，右键单击**表面损耗密度，电 (mf)**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 > 发热和损耗 > mf.Qsrh - 表面损耗密度，电 - W/m²**。
- 3 定位到**着色和样式**栏。从**颜色表**列表中选择 **HeatCamera**。
- 4 在**表面损耗密度，电 (mf)** 工具栏中单击**绘制**。

研究 1/ 解 2 (sol2)

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 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 1/ 解 2 (sol2)** 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**板边界**。

表面积分 2

- 1 在**结果**工具栏中单击**更多派生值**，然后选择**积分 > 表面积分**。
 - 2 在**表面积分**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 2 (sol2)**。
 - 4 定位到**选择**栏。从**选择**列表中选择**板边界**。
 - 5 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 > 发热和损耗 > mf.Qsrh - 表面损耗密度，电**。
 - 6 单击**计算**。
- 结果应接近 27 W。