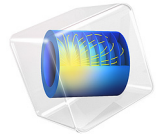


在 COMSOL Multiphysics 6.1 版本中创建



永磁体

简介

本模型介绍如何建模永磁体周围的磁场，还计算了磁铁对附近的铁棒施加的力。利用几何的对称性和磁场的反对称性，我们只需要建模四分之一的几何。

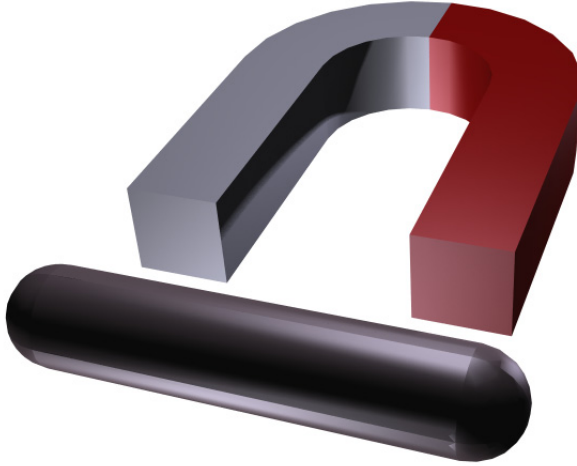


图1：几何的全三维视图。利用左右和上下对称以最大程度减小求解的规模。

模型定义

在无电流区域，

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$$

可以定义磁标势， V_m ，通过以下关系

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m$$

这类似于静电场的电势定义。

使用磁通密度与磁场之间的本构关系

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_{\text{rec}} \mathbf{H} + \mathbf{B}_r$$

（其中 \mathbf{B}_r 是剩余磁通密度）以及方程

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

您可以为 V_m 导出一个方程，

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_{\text{rec}} \nabla V_m - \mathbf{B}_r) = 0$$

本模型使用此方程的方法是选择“AC/DC 模块”中的“磁场，无电流”接口。

边界条件

磁场相对于 xy 平面对称，相对于 xz 平面对称。因此，这些平面作为几何的外部边界。

在对称平面上，磁场与边界相切。这通过磁绝缘条件来描述：

$$\mathbf{n} \cdot (\mu_0 \mu_{\text{rec}} \nabla V_m - \mathbf{B}_r) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0$$

在反对称平面上，磁场与边界垂直。此条件通过恒定的磁标势来表示，本模型使用“零磁标势”条件。

如果外围空气区域足够大，则其余外部边界上使用的边界条件对磁铁附近的磁场几乎没有影响。虽然无限元域会给出最佳结果，但本模型为了方便起见使用磁绝缘条件。

结果与讨论

棒所受的力自动由棒所有边界上的表面应力张量的积分计算而得。应力张量的表达式为

$$\mathbf{n}_1 T_2 = -\frac{1}{2}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{B})\mathbf{n}_1 + (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{H})\mathbf{B}^T$$


其中， \mathbf{n}_1 是从棒指向外的边界法向，而 T_2 是空气的应力张量。积分计算结果为 3.64 N，与棒的四分之一相对应。因此，棒的实际力为此值的四倍，即 14.6 N。

案例库路径： ACDC_Module/Introductory_Magnetostatics/permanent_magnet




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

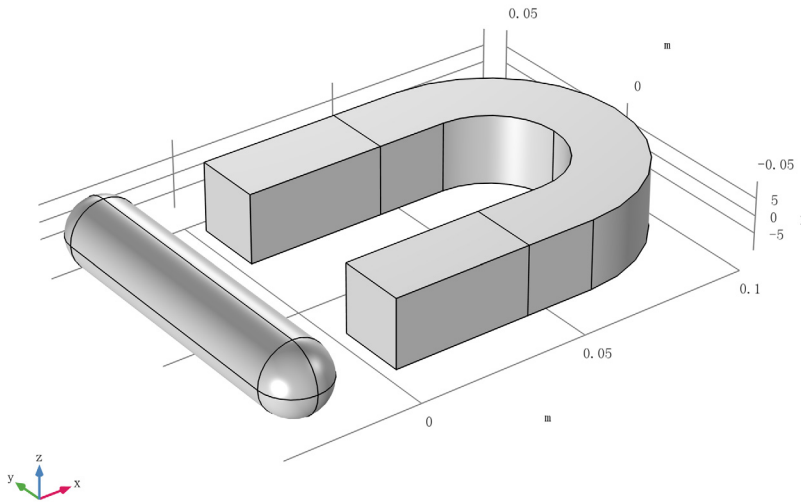
- 1 在**模型向导**窗口中，单击  **三维**。
- 2 在**选择物理场**树中选择 **AC/DC > 磁场，无电流 > 磁场，无电流 (mfnc)**。
- 3 单击**添加**。
- 4 单击  **研究**。
- 5 在**选择研究**树中选择**一般研究 > 稳态**。
- 6 单击  **完成**。

几何 1

导入 1 (impl)


- 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 permanent_magnet.mphbin。

5 单击  导入。



导入的几何包含永磁铁及相应的受力的棒。以下说明介绍了如何创建空气域，以及如何删除不想包含在模型中的几何部分。



长方体 1 (blk1)

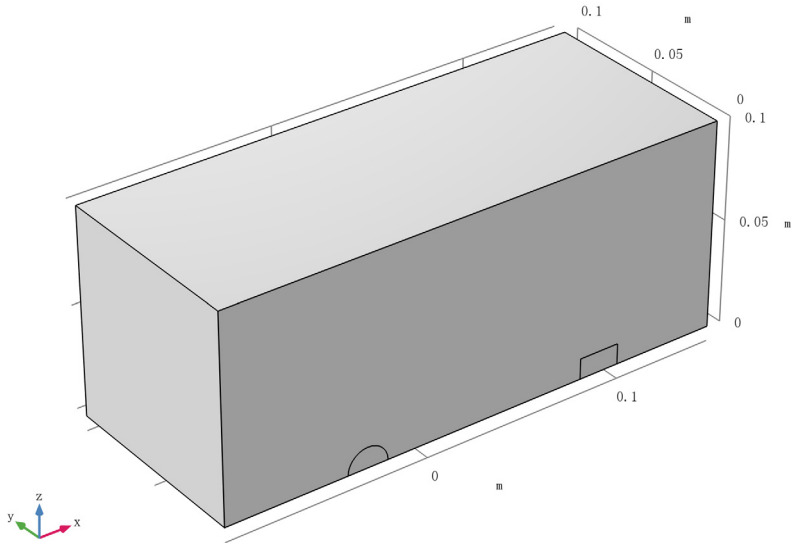
- 1 在几何工具栏中单击  长方体。
- 2 在长方体的设置窗口中，定位到大小和形状栏。
- 3 在宽度文本框中键入“0.25”。
- 4 在深度文本框中键入“0.1”。
- 5 在高度文本框中键入“0.1”。
- 6 定位到位置栏。在 x 文本框中键入“-0.1”。
- 7 右键单击长方体 1 (blk1) 并选择构建选定对象。

空气域目前仅包含您想在模型中模拟的磁铁和棒部分，执行布尔几何操作以去除多余部分。

组合 1 (col)

- 1 在几何工具栏中单击  布尔操作和分割，然后选择组合。
- 2 单击图形窗口，然后按 Ctrl+A 选择这两个对象。

- 3 在**组合**的**设置**窗口中，定位到**组合栏**。
- 4 在**设置公式**文本框中键入 “ $\text{blk1}+\text{imp1}*\text{blk1}$ ”。
- 5 单击  **构建所有对象**。
- 6 在**图形**工具栏中单击  **缩放到窗口大小**按钮。
几何现在包含空气体积和四分之一导入对象。



材料

铁

- 1 在**模型开发者**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，在**标签**文本框中键入 “铁”。
- 3 选择 “域” 2 和 4。
- 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 ; $\text{muri} = \text{mur_iso}$, $\text{muri}j = 0$	4000	1	基本

空气

- 1 右键单击**材料**并选择**空材料**。

- 2 在**材料**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“空气”。
- 3 选择“域”1。
- 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	1	1	基本

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>Hard Magnetic Materials>Sintered NdFeB Grades (Chinese Standard)>N54 (Sintered NdFeB)**。
- 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

N54 (Sintered NdFeB) (mat3)

- 1 在**材料**的**设置**窗口中，定位到**几何实体选择**栏。
- 2 单击  **粘贴选择**。
- 3 在**粘贴选择**对话框中，在**选择**文本框中键入“3”。
- 4 单击**确定**。

磁场，无电流 (MFNC)

磁体 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**节点下，右键单击**磁场，无电流 (mfnc)**并选择**磁体**。
- 2 选择“域”3。

北 1


- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**北 1**。
- 2 选择“边界”17。

南 1

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**南 1**。
- 2 选择“边界”12。


默认情况下，所有外部边界都是磁绝缘的。在反对称边界上使用**对称面**条件。

对称平面 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **边界**，然后选择**对称平面**。
- 2 在**模型开发器**窗口中，单击**对称平面 1**。
- 3 选择“边界”2、8和24。
- 4 在**对称平面**的**设置**窗口中，定位到**对称平面**栏。
- 5 从**磁场的对称类型**列表中选择**反对称**。

然后，在棒上添加一个力计算。

力计算 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **域**，然后选择**力计算**。
- 2 选择“域”2。
- 3 在**力计算**的**设置**窗口中，定位到**力计算**栏。
- 4 在**力名称**文本框中键入“rod”。

网格 1

自由四面体网格 1

为了获得准确的力计算，棒上需要特别细化的网格。在磁铁及其铁芯中使用细化网格也很重要，因为这将是磁场最强的区域。

在**网格**工具栏中单击  **自由四面体网格**。

大小


- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**大小**。
- 2 在**大小**的**设置**窗口中，定位到**单元大小**栏。
- 3 从**预定义**列表中选择**细化**。

大小 1

- 1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**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 选择“域”2-4。
- 5 定位到**单元大小**栏。单击**定制**按钮。
- 6 定位到**单元大小参数**栏。
- 7 选中**最大单元大小**复选框。在关联文本框中键入“0.0025”。

8 单击  全部构建。

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。
- 4 在主屏幕工具栏中单击  计算。

结果

三维绘图组 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。

切面 1

- 1 右键单击三维绘图组 1 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。从菜单中选择组件 1 (comp1) > 磁场，无电流 > 磁 > mfnc.normB - 磁通密度模 - T。
- 3 定位到平面数据栏。从平面列表中选择 xy 平面。
- 4 从定义方法列表中选择坐标。
- 5 在 z 坐标文本框中键入 “0.005”。
- 6 定位到着色和样式栏。单击  更改颜色表。
- 7 在颜色表对话框中，选择模型树中的 Thermal > GrayBody。
- 8 单击确定。
- 9 在三维绘图组 1 工具栏中单击  绘制。

绘图显示对称面上的磁通密度的幅值，可以添加一个箭头图来显示其方向。

体箭头 1


- 1 在模型开发器窗口中，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。从菜单中选择组件 1 (comp1) > 磁场，无电流 > 磁 > mfnc.Bx,mfnc.By,mfnc.Bz - 磁通密度。
- 3 定位到箭头位置栏。找到 x 栅格子栏。在点文本框中键入 “100”。
- 4 找到 y 栅格子栏。在点文本框中键入 “50”。
- 5 找到 z 栅格子栏。从定义方法列表中选择坐标。
- 6 在坐标文本框中键入 “0.0051”。

7 在**三维绘图组 1** 工具栏中单击  绘制。


绘图只显示了用于计算的四分之一几何。

引入更多镜像数据集来绘制完整几何的解。


对称条件

- 1 在**结果**工具栏中单击  **更多数据集**，然后选择**三维镜像**。
- 2 在**三维镜像**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“对称条件”。
- 3 定位到**平面数据**栏。从**平面**列表中选择 **xy 平面**。

反对称条件

- 1 在**结果**工具栏中单击  **更多数据集**，然后选择**三维镜像**。
- 2 在**三维镜像**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“反对称条件”。
- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**对称条件**。
- 4 定位到**平面数据**栏。从**平面**列表中选择 **zx 平面**。
- 5 单击以展开**高级**栏。从**矢量变换**列表中选择**反对称**。

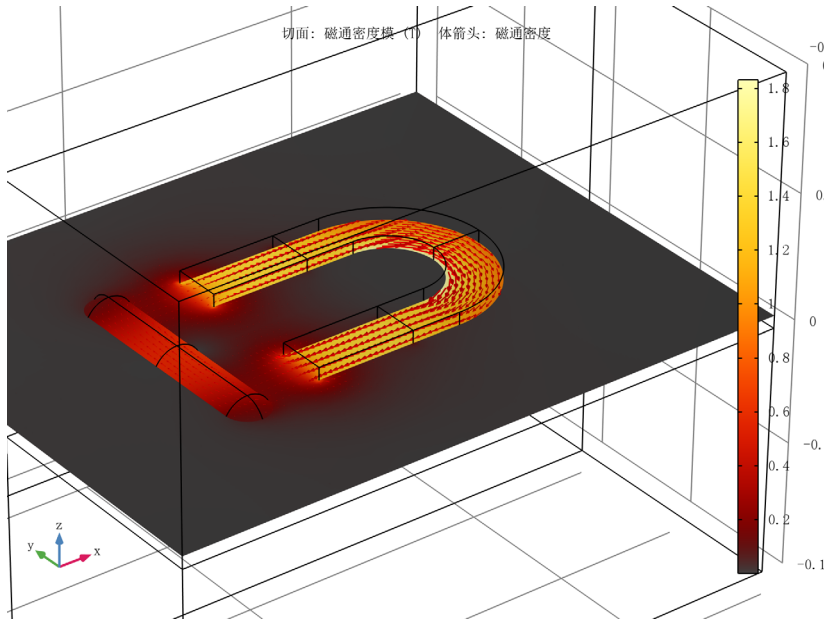
三维绘图组 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**三维绘图组 1**。
- 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**反对称条件**。
- 4 在**三维绘图组 1** 工具栏中单击  绘制。

体箭头 1

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**体箭头 1**。
- 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**组件 1 (comp1) > 磁场, 无电流 > 磁 > mfnc.Bx,mfnc.By,mfnc.Bz - 磁通密度**。


3 在**三维绘图组 1** 工具栏中单击  **绘制**。



三维绘图组 1

最后，使用全局计算来计算棒上的力。

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，单击**表达式**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**组件 1 (comp1) > 磁场, 无电流 > 力学 > 电磁力 - N > mfnc.Forcex_rod - 电磁力, x 分量**。

在**表达式**表格中添加包含四分之一棒中的力变量，乘上 4 计算棒受到的总力。

3 在**表达式**列改为 `mfnc.Forcex_rod*4`。

4 在**描述**列写入棒上的总力。

5 单击  **计算**。

算得的棒上的总力接近于 14.6 N。