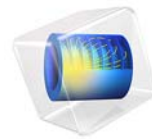


在 COMSOL Multiphysics 5.4 版本中创建



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。

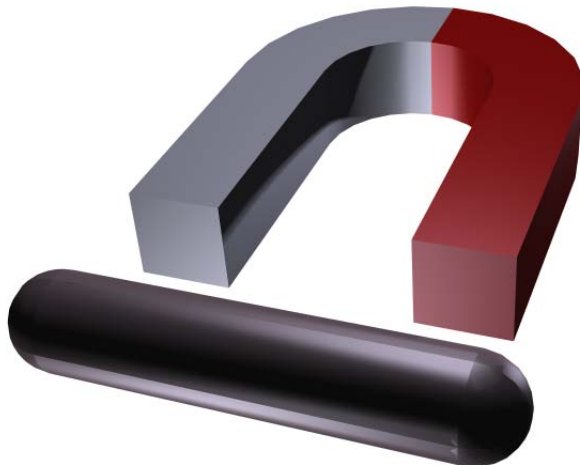


图1：几何的全三维视图。利用左右和上下对称以最大程度减小求解的规模。

模型定义

在无电流区域，

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

可以定义标量磁势， 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

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

以及方程

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

您可以为 V_m 导出一个方程，

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}_0) = 0$$

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：

$$\mathbf{n} \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}_0) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0$$

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“零磁标量势”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 1.53 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 6.11 N。

案例库路径： ACDC_Module/Magnetostatics/permanent_magnet

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

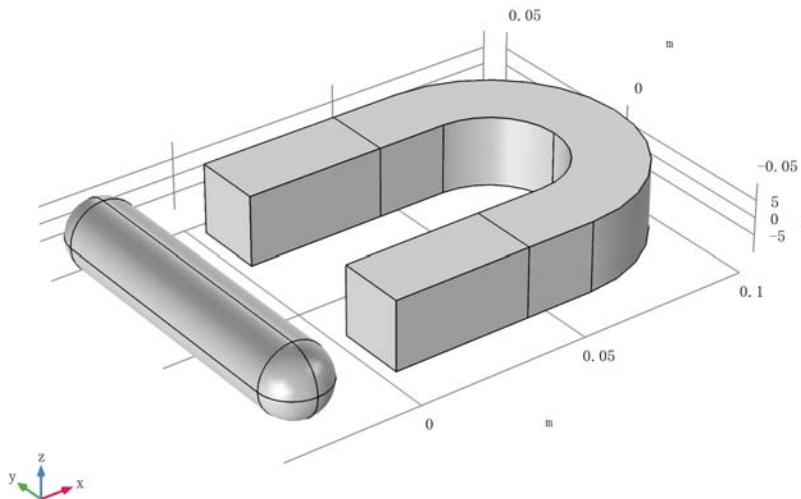
- 1 在**模型向导**窗口中，单击**三维**。
- 2 在**选择物理场**树中选择 **AC/DC> 磁场，无电流 (mfnc)**。
- 3 单击**添加**。
- 4 单击**研究**。
- 5 在**选择研究树**中选择**一般研究 > 稳态**。
- 6 单击**完成**。

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)

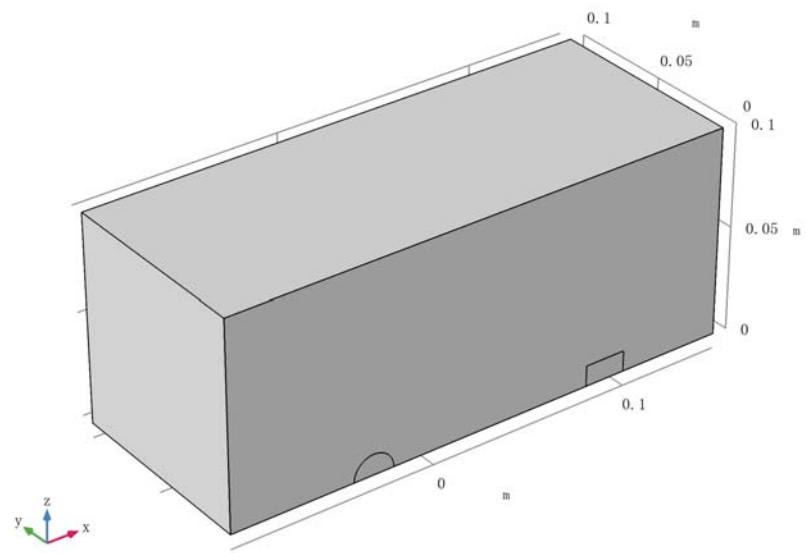
- 1 在几何工具栏中单击**长方体**。
- 2 在长方体的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。
- 3 在**宽度**文本框中键入 “0.25”。
- 4 在**深度**文本框中键入 “0.1”。
- 5 在**高度**文本框中键入 “0.1”。
- 6 定位到**位置**栏。在 **x** 文本框中键入 “-0.1”。
- 7 右键单击**长方体 1 (blk1)** 并选择**构建选定对象**。

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 “blk1+imp1*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

材料 1 (mat1)

- 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 右键单击材料 1 (mat1) 并选择重命名。
- 3 在重命名 “材料” 对话框中，在新标签文本框中键入 “铁”。
- 4 单击确定。
- 5 选择 “域” 2 和 4。
- 6 在材料的设置窗口中，定位到材料属性明细栏。
- 7 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	4000	1	基本

材料 2 (mat2)

- 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 右键单击材料 2 (mat2) 并选择重命名。
- 3 在重命名 “材料” 对话框中，在新标签文本框中键入 “空气”。
- 4 单击确定。
- 5 选择 “域” 1。
- 6 在材料的设置窗口中，定位到材料属性明细栏。
- 7 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, muri = 0	1	1	基本

磁场，无电流 (MFNC)

磁通量守恒 2

- 1 在物理场工具栏中单击域，然后选择磁通量守恒。
- 2 选择 “域” 3。
- 3 在磁通量守恒的设置窗口中，定位到磁场栏。
- 4 从本构关系列表中选择磁化。
- 5 将 **M** 矢量指定为

750 [kA/m]	x
0	y
0	z

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零标量磁势条件。

零标量磁势 1

- 1 在物理场工具栏中单击边界，然后选择零标量磁势。
- 2 选择 “边界” 2、8 和 24。

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

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。

大小

- 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**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**窗口的**组件 1 (comp1)>网格 1**节点下，右键单击**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 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。选中**最大单元大小**复选框。
- 7 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

切面 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 1**并选择**切面**。
- 3 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，无电流 > 磁 > mfnc.normB - 磁通密度模 - T**。
- 4 定位到**平面数据**栏。从**平面**列表中选择**XY 平面**。

- 5 从定义方法列表中选择坐标。
- 6 在 Z 坐标文本框中键入 “0.005”。
- 7 定位到着色和样式栏。从颜色表列表中选择 Thermal。
- 8 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，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。

三维镜像 1

- 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。

三维镜像 2

- 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。选中定义变量复选框。
- 6 在正面指示器文本框中键入 “source”。

在这种设置条件下，数据集将定义一个称为 source 的变量，当它为 1 时表示位于几何的源部分，为 0 时表示位于镜像部分。这个变量可以用来在表达式中区分两种区域。

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**。

在结果图中，几何的负 y 部分的方向是反向的。这是因为镜像数据集用来重构完整的几何时，也镜像了绘图的矢量。可以通过调整表达式来引入反对称条件。

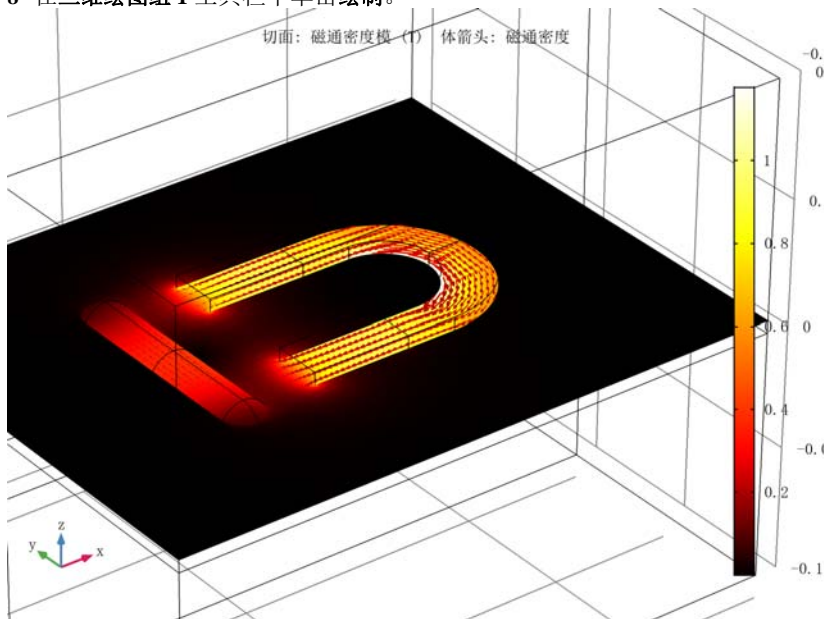
体箭头 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果** > **三维绘图组 1** 节点下，单击**体箭头 1**。
- 2 在**体箭头**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。
- 3 在 **x** 分量文本框中键入 “`mfnc.Bx*if(source,1,-1)`”。
- 4 在 **y** 分量文本框中键入 “`mfnc.By*if(source,1,-1)`”。
- 5 在 **z** 分量文本框中键入 “`mfnc.Bz*if(source,1,-1)`”。

`if(source,1,-1)` 表达式在源区域计算得到 1，在镜像区域计算得到 -1，从而有效地反转了箭头的方向。

- 6 选中**描述**复选框。
- 7 在关联文本框中键入 “磁通密度”。

8 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**模型 > 组件 1 > 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 6.1 N。