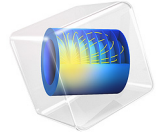


在 COMSOL Multiphysics 6.0 版本中创建



Halbach 转子的静磁场建模

简介

此示例介绍了向外磁通聚集的磁转子的静磁场建模，磁转子由永磁体组成，也称为 Halbach 转子。由于旋转机械中的永磁铁工作时具有无接触、无摩擦等优点，因此在电动机、发电机和磁齿轮等旋转装置中有着广泛应用。此模型阐明了如何利用对称性，通过只模拟发动机的单极转子，得到 4 极转子对的三维磁场分布。

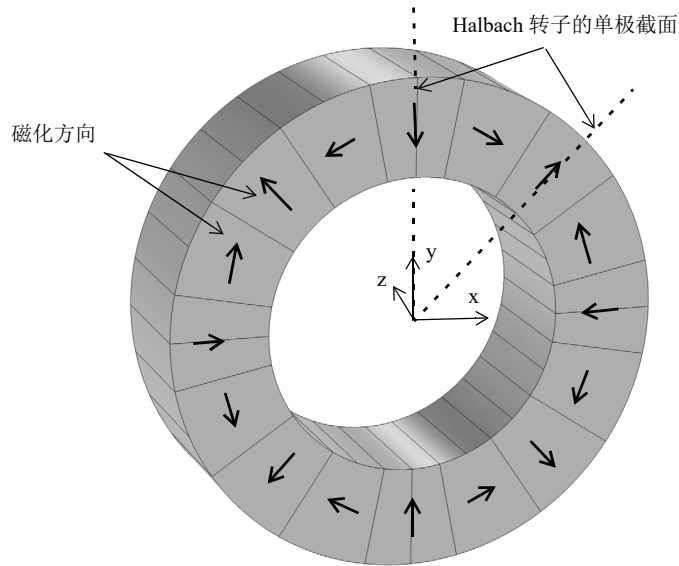


图1：16 段、4 极对 Halbach 转子的图示。此问题具有对称性，因此可以将此模型简化为单极转子。

模型定义

在三维建模空间创建模型。由于对称性，对单极转子进行建模就足够了。图 1 显示整个转子的三维视图以及磁体的磁化方向。黑色箭头表示转子中永磁体的径向和轴向磁化方向。永磁体的这种排列方式可使转子内部的磁通密度最小，而转子外部的磁通密度最大。模型由排列成 4 极转子对的 16 个永磁片构成。转子内外半径分别为 30 mm 和 50 mm。转子的轴向长度为 30 mm。

结果与讨论

我们执行了一个稳态研究分析来计算 Halbach 转子的磁场。磁通密度如图 2 所示。

图 3 和图 4 阐明了径向和环向磁通密度随转子角度变化的情况。此磁通密度取的是 Halbach 转子外部，径向距离转子中心 55 mm 处的磁通密度值。

最后，图 5 和图 6 分别显示了径向上距离转子中心 55 mm 和 25 mm 处的磁通密度模的极坐标图。

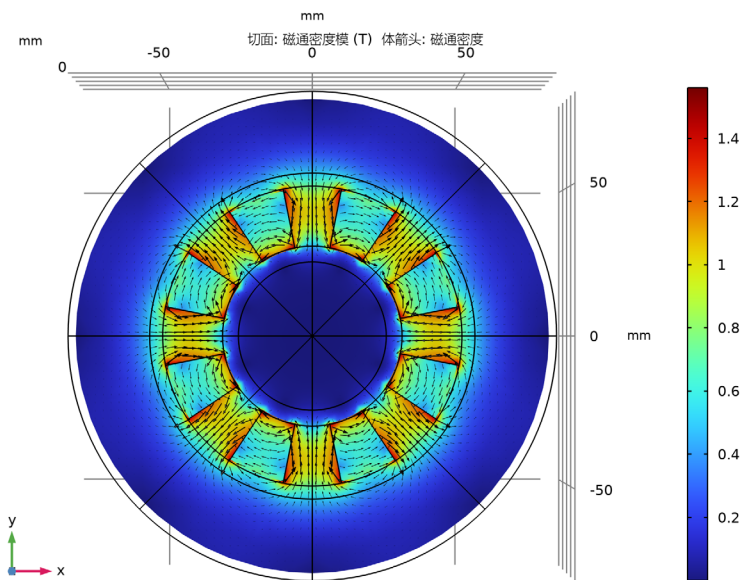


图2: Halbach 转子横截面上的磁通密度模 ($z = 0\text{ mm}$ 处)。

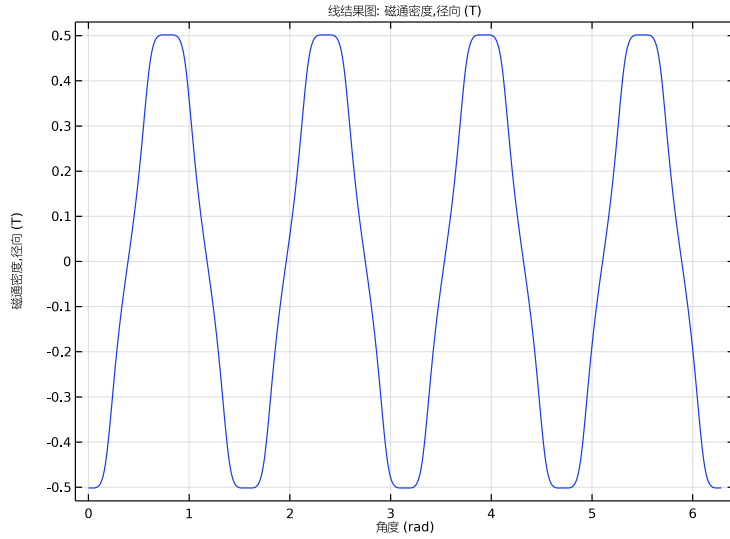


图3: 径向磁通密度随转子角度变化的情况, 转子角度是在径向上距离转子中心 55 mm 处测得的。

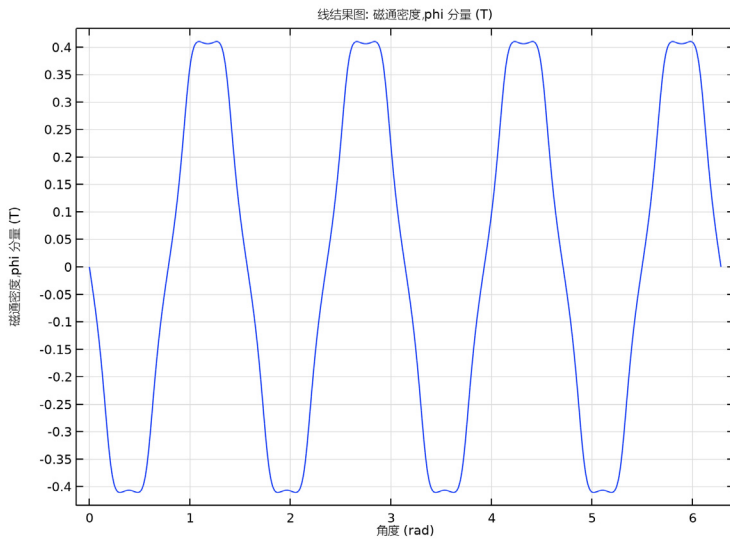


图4: 环向磁通密度随转子角度变化的情况, 转子角度是在径向上距离转子中心 25 mm 处测得的。

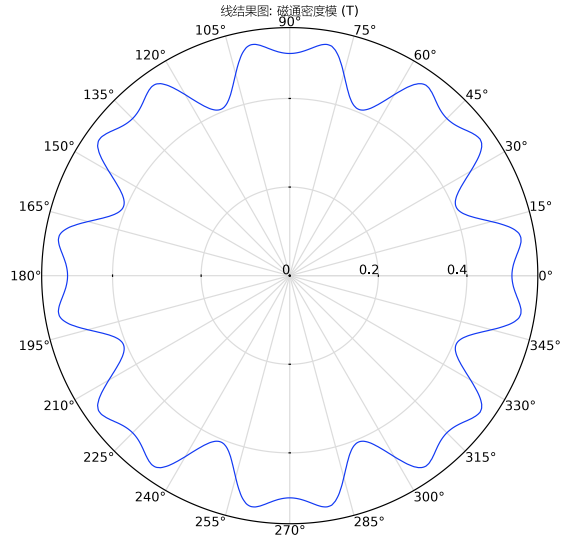


图5：径向上距离转子中心 55 mm 处的磁通密度模的极坐标图。

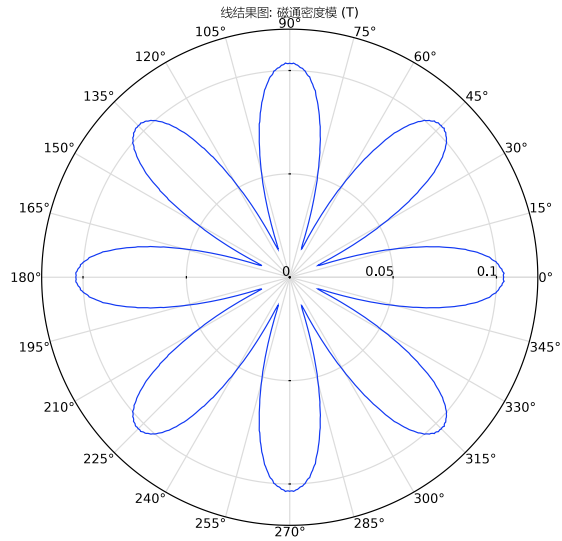



图6：径向上距离转子中心 25 mm 处的磁通密度模的极坐标图。

案例库路径: ACDC_Module/Magnetostatics/static_field_halbach_rotor_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

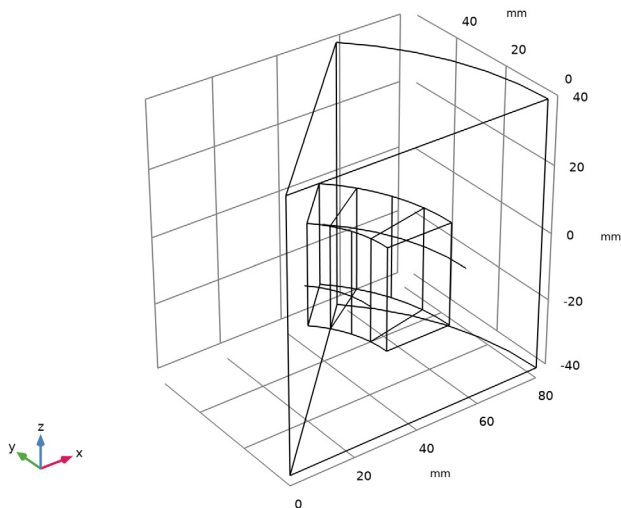
- 1 在**模型向导**窗口中，单击  **三维**。
- 2 在**选择物理场**树中选择 **AC/DC> 电磁场 > 磁场 (mf)**。
- 3 单击**添加**。
- 4 单击  **研究**。
- 5 在**选择研究树**中选择**一般研究 > 稳态**。
- 6 单击  **完成**。

几何 1

从 static_field_halbach_rotor_3d_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**，然后选择**插入序列**。
- 2 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 static_field_halbach_rotor_3d_geom_sequence.mph。
- 3 在**几何**工具栏中单击  **全部构建**。
- 4 在**图形**工具栏中单击  **缩放到窗口大小按钮**。


5 在图形工具栏中单击  线框渲染按钮。



为磁体定义一个选择。



定义

磁铁



- 1 在定义工具栏中单击  显式。
- 2 选择“域”2-4。
- 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“磁铁”。
- 5 单击**确定**。

添加一个新的柱坐标系。我们将使用此坐标系来指派永磁体的磁化。

柱坐标系 2 (sys2)

- 1 在定义工具栏中单击  坐标系，然后选择**柱坐标系**。
使用**向量变换**定义表示径向磁通密度和环向磁通密度的变量。
- 2 在**模型开发器**工具栏中单击  **显示更多选项**按钮。
- 3 在**显示更多选项**对话框中，在树中，选中**常规 > 变量实用程序**节点的复选框。
- 4 单击**确定**。

矢量变换 1 (vectrl)

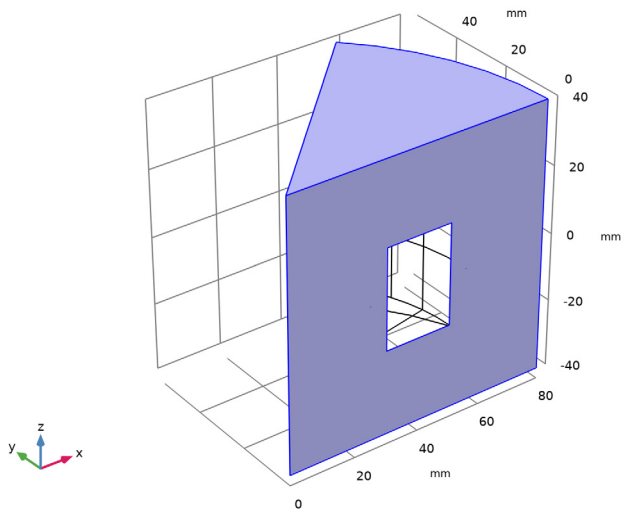
- 1 在定义工具栏中单击  变量实用程序，然后选择矢量变换。
- 2 在矢量变换的设置窗口中，在名称文本框中键入 “B_cyl”。
- 3 清除所有域。
- 4 在图形工具栏中单击  全选按钮。
- 5 单击输入栏右上角的替换表达式。从菜单中选择组件 1 (comp1)> 磁场> 磁> 磁通密度> mf.B_s - 磁通密度 - T。
- 6 定位到输出栏。从坐标系列表中选择柱坐标系 2 (sys2)。
- 7 定位到变换设置栏。从变换为列表中选择通量矢量。

视图 1

隐藏几个边界，以便仅查看模型域内部的结果。

对物理场隐藏 1

- 1 在模型开发器窗口中，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、2 和 4。




磁场 (MF)

现在设置**磁场**物理场。使用**安培定律**对永磁体进行建模。

磁铁，磁化向外

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) 节点下，右键单击磁场 (mf) 并选择安培定律。
- 2 选择“域”2。
- 3 在安培定律的设置窗口中，定位到坐标系选择栏。
- 4 从坐标系列表中选择柱坐标系 2 (sys2)。
- 5 定位到本构关系 B-H 栏。从磁化模型列表中选择剩余磁通密度。
- 6 在标签文本框中键入“磁铁，磁化向外”。


磁铁，磁化向内

- 1 在物理场工具栏中单击  域，然后选择安培定律。
- 2 选择“域”4。
- 3 在安培定律的设置窗口中，定位到坐标系选择栏。
- 4 从坐标系列表中选择柱坐标系 2 (sys2)。
- 5 定位到本构关系 B-H 栏。从磁化模型列表中选择剩余磁通密度。
- 6 将 \mathbf{e} 矢量指定为

-1	r
0	phi
0	a

- 7 在标签文本框中键入“磁铁，磁化向内”。

磁铁，逆时针磁化

- 1 在物理场工具栏中单击  域，然后选择安培定律。
- 2 选择“域”3。
- 3 在安培定律的设置窗口中，定位到坐标系选择栏。
- 4 从坐标系列表中选择柱坐标系 2 (sys2)。
- 5 定位到本构关系 B-H 栏。从磁化模型列表中选择剩余磁通密度。
- 6 将 \mathbf{e} 矢量指定为

0	r
1	phi
0	a

- 7 在标签文本框中键入“磁铁，逆时针磁化”。

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 右键单击并选择添加到 “组件 1 (comp1)”。
- 5 在模型树中选择 AC/DC > Hard Magnetic Materials > Sintered NdFeB Grades (Chinese Standard) > N50 (Sintered NdFeB)。
- 6 右键单击并选择添加到 “组件 1 (comp1)”。
- 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

N50 (Sintered NdFeB) (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铁。

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粗化。

大小 1

- 1 右键单击组件 1 (comp1) > 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 从选择列表中选择磁铁。
- 5 定位到单元大小栏。从预定义列表中选择细化。

在要计算磁通密度的曲线上指定非常细化的网格，这有助于得到磁通密度的平滑曲线。


大小 2


- 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边。
- 4 选择 “边” 6 和 31。
- 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。

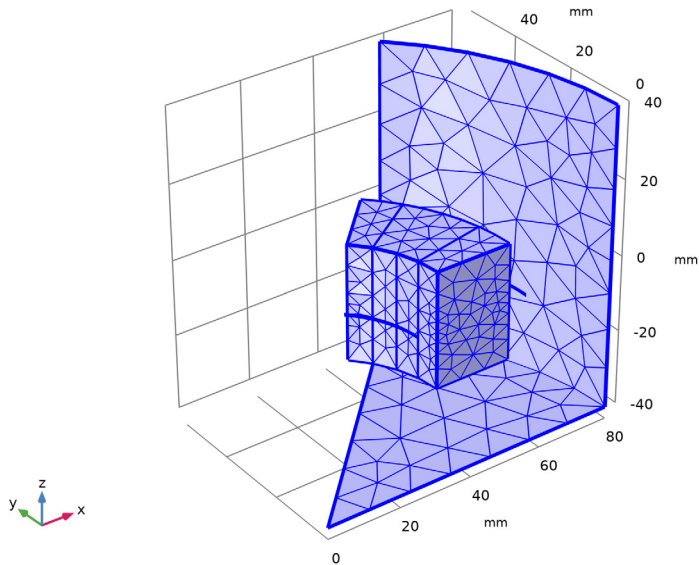
7 在关联文本框中键入“0.5”。

自由四面体网格 1

1 在**网格**工具栏中单击  **自由四面体网格**。

2 在**自由四面体网格**的**设置**窗口中，单击  **全部构建**。

将网格与下图进行比较。




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

使用“三维扇区”数据集根据单极结果生成整个三维模型的三维数据集。

三维扇区 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**结果**节点。


2 右键单击**结果 > 数据集**并选择**更多三维数据集 > 三维扇区**。

- 3 在**三维扇区的设置**窗口中，定位到**对称**栏。
- 4 在**扇区数**文本框中键入“8”。
- 5 从**变换**列表中选择**旋转和反射**。
- 6 单击以展开**高级**栏。选中**定义变量**复选框。


特征 **扇区数**稍后将用于得到图 4 中 $B_{cyl.vphi}$ 的正确表达式。

接下来，构建圆，将 Halbach 转子内部和外部的磁通密度可视化。

三维参数化曲线 1


- 1 在**结果**工具栏中单击  **更多数据集**，然后选择**三维参数化曲线**。
- 2 在**三维参数化曲线**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。
- 3 从**数据集**列表中选择**三维扇区 1**。
- 4 定位到**参数**栏。在**名称**文本框中键入“phi”。
- 5 在**最大值**文本框中键入“ 2π ”。
- 6 定位到**表达式**栏。在 **x** 文本框中键入“ $55\cos(\phi)$ ”。
- 7 在 **y** 文本框中键入“ $55\sin(\phi)$ ”。

三维参数化曲线 2

- 1 在**结果**工具栏中单击  **更多数据集**，然后选择**三维参数化曲线**。
- 2 在**三维参数化曲线**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。
- 3 从**数据集**列表中选择**三维扇区 1**。
- 4 定位到**参数**栏。在**名称**文本框中键入“phi”。
- 5 在**最大值**文本框中键入“ 2π ”。
- 6 定位到**表达式**栏。在 **x** 文本框中键入“ $25\cos(\phi)$ ”。
- 7 在 **y** 文本框中键入“ $25\sin(\phi)$ ”。


按照以下操作说明来重现图 2 所示的绘图。

B 场



- 1 在**结果**工具栏中单击  **三维绘图组**。
- 2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“B 场”。
- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**三维扇区 1**。

切面 1

- 1 右键单击 **B 场**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 **xy 平面**。


- 4 在平面数文本框中键入 “1”。
- 5 在 **B 场** 工具栏中单击  绘制。

体箭头 1


- 1 在模型开发器窗口中，右键单击 **B 场** 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 “60”。
- 4 找到 **y 栅格子** 栏。在点文本框中键入 “60”。
- 5 找到 **z 栅格子** 栏。在点文本框中键入 “1”。
- 6 定位到着色和样式栏。从颜色列表中选择黑色。
- 7 在 **B 场** 工具栏中单击  绘制。
- 8 在图形工具栏中单击  切换到 XY 平面视图按钮。

接下来，生成 Halbach 转子外部的径向磁通密度图。将结果与图 3 进行比较。

Br vs. phi


- 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，在标签文本框中键入 “Br vs. phi”。
- 3 定位到数据栏。从数据集列表中选择三维参数化曲线 1。
- 4 定位到绘图设置栏。选中 **x 轴标签** 复选框。
- 5 在关联文本框中键入 “角度 (rad)”。

线结果图 1

- 1 右键单击 **Br vs. phi** 并选择线结果图。
- 2 在线结果图的设置窗口中，单击 **y 轴数据** 栏右上角的替换表达式。从菜单中选择组件 1 (comp1) > 定义 > 矢量变换 1 (B_cyl) > 变换矢量 - T > B_cyl.vr - 变换矢量, r 分量。
- 3 定位到 **x 轴数据** 栏。从参数列表中选择表达式。
- 4 在表达式文本框中键入 “phi”。
- 5 定位到 **y 轴数据** 栏。选中描述复选框。
- 6 在关联文本框中键入 “磁通密度, 径向”。
- 7 在 **Br vs. phi** 工具栏中单击  绘制。


创建如图 4 所示的环向磁通密度图。

Bphi vs. phi

- 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，在标签文本框中键入 “Bphi vs. phi”。

- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**三维参数化曲线 1**。
- 4 定位到**绘图设置**栏。选中**x 轴标签**复选框。
- 5 在关联文本框中键入 “角度 (rad)”。

线结果图 1


- 1 右键单击 **Bphi vs. phi** 并选择**线结果图**。
- 2 在线结果图的**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**组件 1 (comp1)> 定义 > 矢量变换 1 (B_cyl)> 变换矢量 - T>B_cyl.vphi - 变换矢量, phi 分量**。
- 3 定位到 **y 轴数据**栏。在表达式文本框中键入 “ $B_cyl.vphi * (1 - 2 * \text{mod}(\text{sec1number}, 2))$ ”。
- 4 选中**描述**复选框。
- 5 在关联文本框中键入 “磁通密度, phi 分量”。
- 6 定位到 **x 轴数据**栏。从**参数**列表中选择**表达式**。
- 7 在**表达式**文本框中键入 “phi”。
- 8 在 **Bphi vs. phi** 工具栏中单击  **绘制**。

这里，表达式 $B_cyl.vphi * (1 - 2 * \text{mod}(\text{sec1number}, 2))$ 可能需要一些附加说明：转子的偶数扇区相对于奇数扇区在 phi 方向发生镜像。原始数据集仅包含一个奇数扇区的 $B_cyl.vphi$ 值。添加的校正项使用模算子；其每隔一个扇区在 +1 与 -1 之间翻转一次。

绘制 **体箭头 1** 不需要执行类似的数据操作，原因在于它已将输入 ($mf.Bx$ 、 $mf.By$ 、 $mf.Bz$) 视为矢量场，因此能够自身实现变换。而另一方面，**线结果图 1** 无法将其输入与某一 “方向” 相关联。因此，它将 $B_cyl.vphi$ 视为一个标量。


接下来，在距离转子中心 55 mm 处生成磁通密度模的极坐标图。

normB vs. phi at r=55 mm

- 1 在主屏幕工具栏中单击  **添加绘图组**，然后选择**极坐标绘图组**。
- 2 在**极坐标绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “normB vs. phi at r=55 mm”。
- 3 定位到**数据**栏。从**数据集**列表中选择**三维参数化曲线 1**。
- 4 定位到**轴**栏。选中**手动轴限制**复选框。
- 5 在 **r 最大值**文本框中键入 “0.56”。


线结果图 1

- 1 右键单击 **normB vs. phi at r=55 mm** 并选择**线结果图**。
- 2 在线结果图的**设置**窗口中，定位到 **θ 角数据**栏。


- 3 从参数列表中选择表达式。
- 4 在表达式文本框中键入 “phi”。
- 5 在 **normB vs. phi at r=55 mm** 工具栏中单击  绘制。

最后，在距离转子中心 25 mm 处重现磁通密度模图。

normB vs. phi at r=25 mm

- 1 在主屏幕工具栏中单击  添加绘图组，然后选择极坐标绘图组。
- 2 在极坐标绘图组的设置窗口中，在标签文本框中键入 “normB vs. phi at r=25 mm”。
- 3 定位到数据栏。从数据集列表中选择三维参数化曲线 2。
- 4 定位到轴栏。选中手动轴限制复选框。
- 5 在 r 最大值文本框中键入 “0.12”。

线结果图 1

- 1 右键单击 **normB vs. phi at r=25 mm** 并选择线结果图。
- 2 在线结果图的设置窗口中，定位到 θ 角数据栏。
- 3 从参数列表中选择表达式。
- 4 在表达式文本框中键入 “phi”。
- 5 在 **normB vs. phi at r=25 mm** 工具栏中单击  绘制。

将此图与图 6 进行比较。