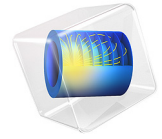


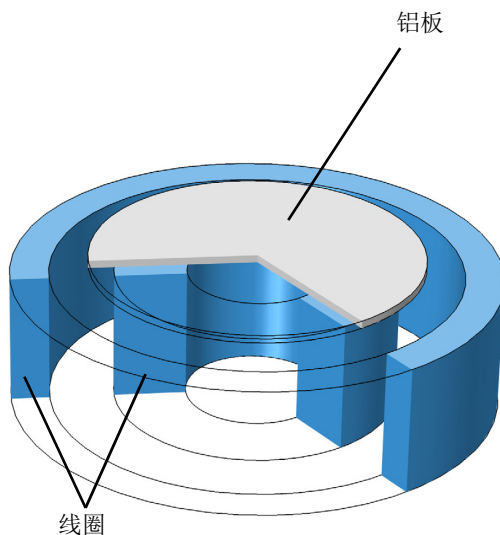
在 COMSOL Multiphysics 5.4 版本中创建



电动悬浮装置

简介

此验证 App 基于 TEAM 基准问题 28 “电动悬浮装置”（[参考文献 1](#)）。此装置中，一块圆形铝板放置在两个圆柱形同心线圈上方，线圈中通有方向相反的时谐交变电流。线圈产生的时变磁场在铝板中感应产生涡流，涡流又会产生一个排斥力，使铝板悬浮于线圈上方一定高度。



此 App 模拟从线圈通电到 1.7 s 后瞬态过程结束这个时域内铝板的动力学。结果与 TEAM 问题规范提供的实验数据进行了比较，尤其是铝板的位置。

模型定义

由于系统呈旋转对称，所以使用二维轴对称几何。磁问题（包括涡流）使用**磁场**接口求解，铝板的刚体动力学作为常微分方程 (ODE) 系统求解，通过**全局常微分和微分代数方程**接口实现。最后，铝板的移动通过**动网格**接口建模。

磁问题

“磁场”接口用于计算磁场和涡流。圆柱形同心线圈采用**均匀多匝型线圈**进行模拟。此特征在方位角方向应用均匀电流密度。

使用**力计算**特征计算作用在铝板上的力，该特征在铝板边界对麦克斯韦应力张量积分。

铝板动力学

铝板作为刚体受到以下两个力的作用移动：重力以及作用在感应涡流上的电磁力。由于采用轴对称模型，铝板仅在轴向移动；铝板位移的 z 分量由以下常微分方程控制：

$$\ddot{u} = \frac{F_{em} - F_g}{m_p} \quad (1)$$

其中， F_{em} 是电磁力， F_g 是重力， m_p 是铝板的质量。该常微分方程使用**全局常微分和微分代数方程**接口来求解，可改写为一阶常微分方程组，这样做通常可以改进性能和提高稳定性：

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{F_{em} - F_g}{m_p} \\ \dot{u} &= v \end{aligned} \quad (2)$$

动网格接口

“动网格”接口可用于所有或部分几何相对于绝对参考坐标系移动的模型。在 COMSOL Multiphysics 中，该参考坐标系称为**空/间**坐标系，默认情况下，其坐标为小写字母 (x, y, z ，轴对称情况下为 r, ϕ, z)。相对材料静止的坐标系称为**材料**坐标系，默认情况下，其坐标为大写字母 (X, Y, Z ，轴对称情况下为 R, Φ, Z)。

“动网格”接口使空间坐标系中的网格按照坐标变换所定义的进行变形：

$$\begin{aligned} x &= f(X, Y, Z, \dots) \\ y &= g(X, Y, Z, \dots) \\ z &= h(X, Y, Z, \dots) \end{aligned} \quad (3)$$

变量 x 、 y 和 z 是空间坐标系中网格点的坐标。函数 f 、 g 和 h 是任意的，它们的自变量通常是材料坐标系 (X, Y, Z) 中的点坐标。

函数 f 、 g 和 h 可由用户使用**指定变形**特征明确定义，如果使用**自由变形**特征，则通过“动网格”接口中用户定义的边界条件进行计算。务必确保函数在任意位置连续，并且不会产生反转网格单元。

在此 App 中，为了改进求解性能，函数已明确给出。在轴对称模式中，铝板表示为与轴接触的矩形，周围是空隙（空气）区域：

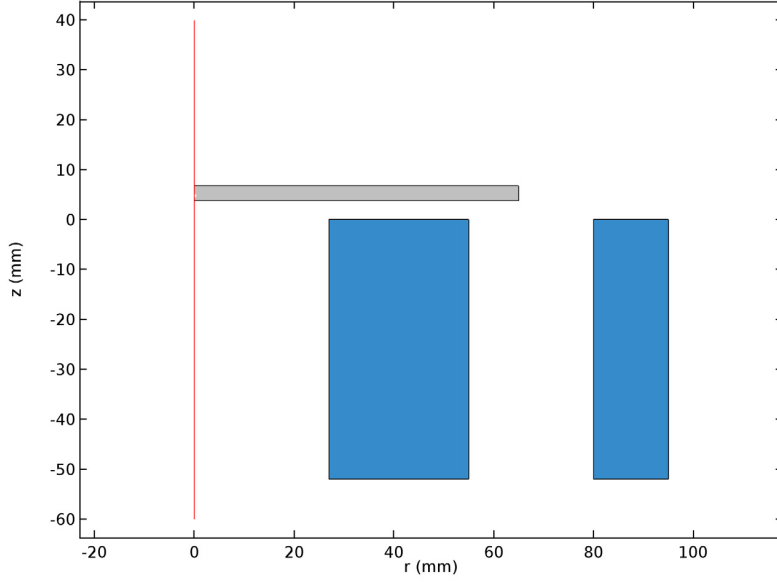


图1：系统的轴对称表示。

轴对称几何中的面内坐标为 r, z （空间坐标系）和 R, Z （材料坐标系）。使用的坐标系变换函数为：

$$\begin{aligned} r &= R \\ z &= h(R, Z, u) \end{aligned} \quad (4)$$

其中， u 是铝板的瞬时位移，选择 h 时，使其从零（在空气区域外部边界处）到 u （铝板中）呈连续变化。由于对称， h 可以写为：

$$h(R, Z, u) = u \cdot s_1(R) \cdot s_2(Z) \quad (5)$$

其中， s_1 和 s_2 是几何的（参数化）映射，使用变量特征定义。 $s_1 s_2$ 乘积的绘图如图 2 所示。

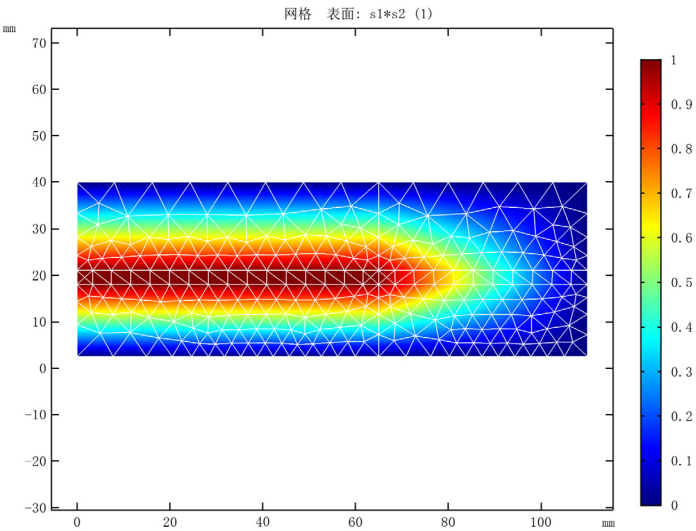


图 2：变形域的参数化。参数化用于刚性移动铝板，并使周围空气域中的网格连续变形。

在时域中求解

系统随两个时间尺度演变：线圈激励电流的频率为 50 Hz，而铝板位移变化大概在十分之一秒量级。**瞬态**研究步骤中指定的时间步决定可用于后处理的存储时间点。越小的时间步意味着可以在后处理中绘制越多时间点的场分布图，但相应的代价是增加了内存使用率。

指定的时间步大小不会影响求解，只影响后处理：求解器会自动选择合适的时间步长来解析两个时间尺度中最快的那个。此 App 中瞬态研究中设置的步长很小，足以解析铝板动力学，但不足以解析交流频率。为了对铝板位移进行准确的后处理，使用了“探针”，它记录在求解器所有时间步时指定变量的值。

结果与讨论

此 App 使用**求解过程中的结果**功能将求解过程中网格的变形情况可视化。图 3 显示 $t = 0.16\text{ s}$ 时的网格和变形，此时铝板位于第一次振荡的最低点。网格根据“指定变形”特征中定义的函数变形，以反映铝板的位移。

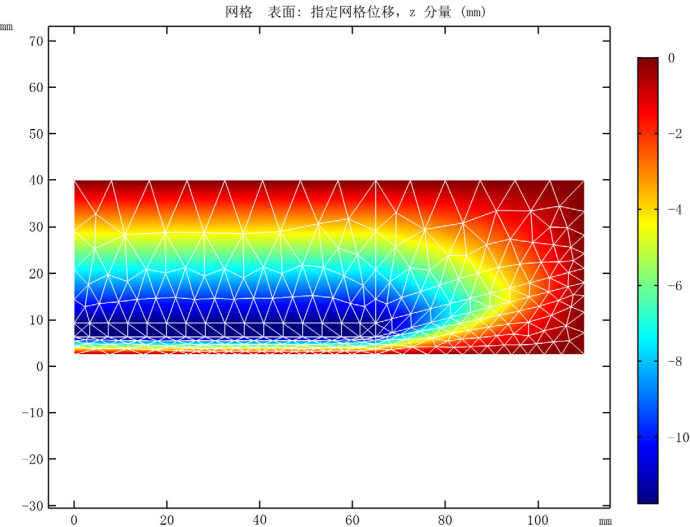


图3: $t = 0.16\text{ s}$ 时的网格图（线框）和垂直变形（彩色）。

图 4 显示 $t = 0.01\text{ s}$ 时的磁通密度模和场线。

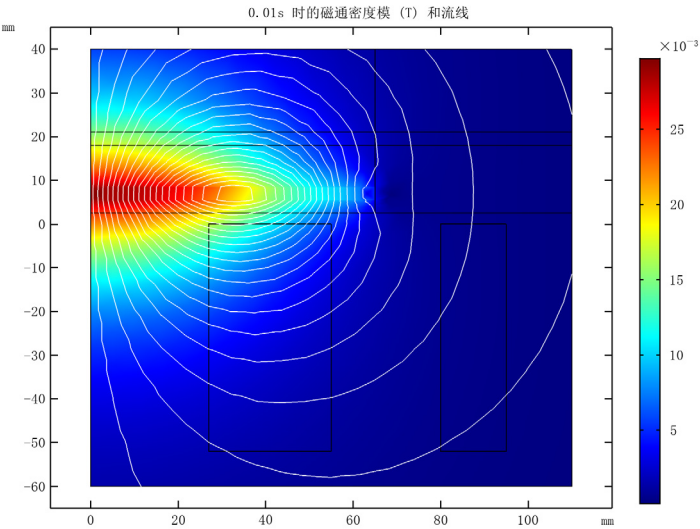


图 4: $t = 0.01\text{ s}$ 时的磁通密度模和场线。

图 5 显示计算得出的铝板位移与参考文献 1 中提供的实验数据之间的比较结果。铝板位移通常都能够成功解析，产生差异的原因是，模拟多匝线圈的矩形比实际的线圈形状更为方正，如原始参考文献中所详述的。

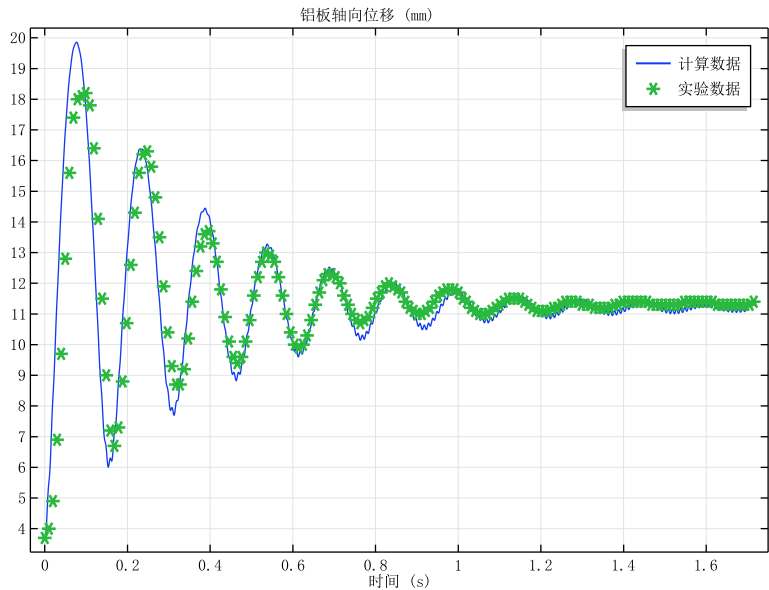


图5：计算得出的垂直铝板位移随时间的变化情况（蓝线）与实验结果（绿色标记）的比较。

参考文献

1. <http://www.compumag.org/jsite/team.html>

案例库路径: ACDC_Module/Verification_Examples/
electrodynmic_levitation_device

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**二维轴对称**。
- 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 **数学 > 常微分和微分代数方程接口 > 全局常微分和微分代数方程 (ge)**。
- 5 单击**添加**。
- 6 在**选择物理场树**中选择 **数学 > 变形网格 > 动网格 (ale)**。
- 7 单击**添加**。
- 8 单击**研究**。
- 9 在**选择研究树**中选择 **一般研究 > 瞬态**。
- 10 单击**完成**。

全局定义

从文本文件导入模型参数。

- 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 单击**从文件加载**。
- 4 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 `electrodynamic_levitation_device_parameters.txt`。

几何 1

创建二维轴对称几何。

- 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**。

矩形 1 (r1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**体素**，然后选择**矩形**。
- 2 在**矩形的设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“线圈 1”。
- 3 定位到**大小和形状**栏。在**宽度**文本框中键入“28”。
- 4 在**高度**文本框中键入“52”。
- 5 定位到**位置**栏。从**基**列表中选择**居中**。
- 6 在**r**文本框中键入“41”。

7 在 **z** 文本框中键入 “-26”。

矩形 2 (r2)

- 1 在几何工具栏中单击**体素**，然后选择**矩形**。
- 2 在矩形的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “线圈 2”。
- 3 定位到**大小和形状**栏。在**宽度**文本框中键入 “15”。
- 4 在**高度**文本框中键入 “52”。
- 5 定位到**位置**栏。从**基**列表中选择**居中**。
- 6 在 **r** 文本框中键入 “87.5”。
- 7 在 **z** 文本框中键入 “-26”。

为铝板域和空气域添加多层矩形，这种多层结构更易于定义网格变形。

矩形 3 (r3)

- 1 在几何工具栏中单击**体素**，然后选择**矩形**。
- 2 在矩形的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。
- 3 在**宽度**文本框中键入 “120”。
- 4 在**高度**文本框中键入 “50-2.5”。
- 5 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入 “2.5”。
- 6 单击以展开**层**栏。在表中输入以下设置：

层名称	厚度 (mm)
层 1	$(39-3)/2-2.5$
层 2	3
层 3	$40-(39+3)/2$

- 7 单击**构建选定对象**。

矩形 4 (r4)

- 1 在几何工具栏中单击**体素**，然后选择**矩形**。
- 2 在矩形的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。
- 3 在**宽度**文本框中键入 “120”。
- 4 在**高度**文本框中键入 “50-2.5”。
- 5 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入 “2.5”。

6 定位到**层**栏。在表中输入以下设置：

层名称	厚度 (mm)
层 1	65
层 2	45

7 清除**层在底面**复选框。

8 选中**层在左侧**复选框。

9 单击**构建选定对象**。

矩形 5 (r5)

1 在几何工具栏中单击**体素**，然后选择**矩形**。

2 在**矩形**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 “120”。

4 在**高度**文本框中键入 “72.5”。

5 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入 “-70”。

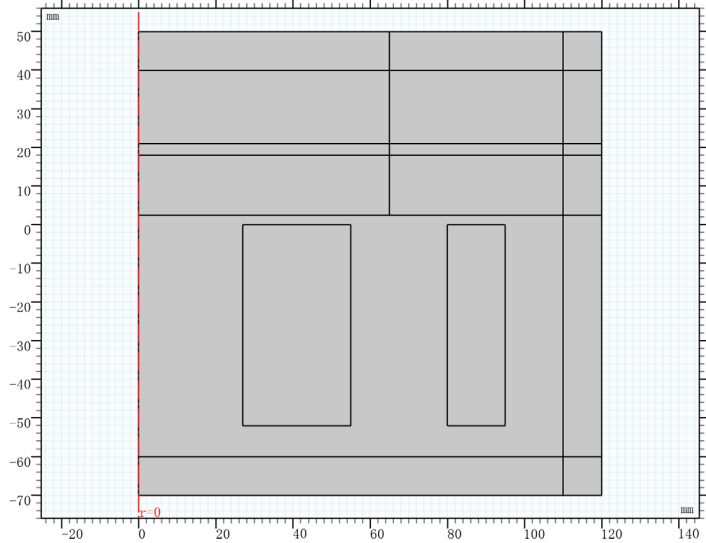
6 定位到**层**栏。在表中输入以下设置：

层名称	厚度 (mm)
层 1	10

7 选中**层在右侧**复选框。

8 单击**构建选定对象**。

9 在图形工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮。



几何现已完成。

为无限元域添加一个显式选择。

10 在**定义**工具栏中单击**显式**。

定义

显式 1

- 1 在**模型**开发器窗口的**组件 1 (comp1)**> **定义**节点下，单击**显式 1**。
- 2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “无限元域”。
- 3 选择 “域” 1、6、11 和 13-18。
- 4 在**定义**工具栏中单击**无限元域**。

无限元域 1 (iel)

- 1 在**模型**开发器窗口的**组件 1 (comp1)**> **定义**> **域属性**节点下，单击**无限元域 1 (iel)**。
- 2 在**无限元域**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**无限元域**。
- 4 定位到**几何**栏。从**类型**列表中选择**柱面**。

材料

定义要在模型中使用的材料。

材料 1 (mat1)

- 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 在**材料**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “空气”。
- 3 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
电导率	sigma_iso ; sigmaii = sigma_iso, sigmaij = 0	0	S/m	基本
相对介电常数	epsilon_iso ; epsilonii = epsilon_iso, epsilonij = 0	1	1	基本

材料 2 (mat2)

- 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 “铝”。
- 3 选择 “域” 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 ; murii = mur_iso, murij = 0	1	1	基本
电导率	sigma_iso ; sigmaii = sigma_iso, sigmaij = 0	sigma	S/m	基本
相对介电常数	epsilon_iso ; epsilonii = epsilon_iso, epsilonij = 0	1	1	基本

铝板是在参考坐标系中移动的固体导体。为了正确地分析导体移动对磁场的影响，将材料类型明确设置为 “固体”。

磁场 (MF)

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 选择 “域” 4。
- 3 在**安培定律**的**设置**窗口中，定位到**材料类型**栏。
- 4 从**材料类型**列表中选择**固体**。

创建两个**线圈**特征。

线圈 1

- 1 在物理场工具栏中单击域，然后选择线圈。
- 2 选择“域”7。
- 3 在线圈的设置窗口中，定位到材料类型栏。
- 4 从材料类型列表中选择固体。
- 5 定位到线圈栏。从导线模型列表中选择均匀多匝。
- 6 在 I_{coil} 文本框中键入 “ $I0*\sin(2*\pi*f0*t)$ ”。
- 7 定位到均匀多匝导线栏。在 N 文本框中键入 “ Ni ”。
- 8 从线圈导线截面积列表中选择来自圆导线直径。
- 9 在 d_{coil} 文本框中键入 “ d_{wire} ”。

线圈 2

- 1 在物理场工具栏中单击域，然后选择线圈。
- 2 选择“域”12。
- 3 在线圈的设置窗口中，定位到材料类型栏。
- 4 从材料类型列表中选择固体。
- 5 定位到线圈栏。从导线模型列表中选择均匀多匝。
- 6 在 I_{coil} 文本框中键入 “ $-I0*\sin(2*\pi*f0*t)$ ”。
- 7 定位到均匀多匝导线栏。在 N 文本框中键入 “ No ”。
- 8 从线圈导线截面积列表中选择来自圆导线直径。
- 9 在 d_{coil} 文本框中键入 “ d_{wire} ”。

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”4。
添加要在铝板动力学的定义中使用的变量。
- 3 右键单击力计算 1 并选择变量。

定义

变量 1

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1)> 定义节点下，单击变量 1。
- 2 在变量的设置窗口中，定位到变量栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
F_g	M_disc*g_const	N	重力

全局常微分和微分代数方程 (GE)

将铝板动力学指定为一对常微分方程。为了在求解过程中获得更好的性能和稳定性，仅指定一阶常微分方程通常是一种比较好的处理方式。为此，对铝板的速度添加一个额外的自由度。

在物理场工具栏中单击**磁场 (mf)**，然后选择**全局常微分和微分代数方程 (ge)**。

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**全局常微分和微分代数方程 (ge)**。
- 2 在**全局常微分和微分代数方程**的设置窗口中，在**标签**文本框中键入 “铝板动力学”。

铝板动力学 (GE)

在物理场工具栏中单击**全局常微分和微分代数方程 (ge)**，然后选择**铝板动力学 (ge)**。

全局方程 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 铝板动力学 (ge)** 节点下，单击**全局方程 1**。
- 2 在**全局方程**的设置窗口中，定位到**单位**栏。
- 3 单击**选择因变量物理量**。
- 4 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “速度”。
- 5 单击**过滤器**。
- 6 在模型树中选择**常规 > 速度 (m/s)**。
- 7 单击**确定**。
- 8 在**全局方程**的设置窗口中，定位到**单位**栏。
- 9 单击**选择源项物理量**。
- 10 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “加速度”。
- 11 单击**过滤器**。
- 12 在模型树中选择**常规 > 加速度 (m/s^2)**。
- 13 单击**确定**。
- 14 在**全局方程**的设置窗口中，定位到**全局方程**栏。
- 15 在表中输入以下设置：

名称	$f(u,ut,utt,t)$ (m/s^2)	描述
v	$d(v,t)+(F_g-mf.Forcez_0)/M_disc$	铝板速度

16 在**模型开发器**窗口中，单击**铝板动力学 (ge)**。

全局方程 2

- 1 在**全局常微分和微分代数方程**工具栏中单击**全局方程**。
- 2 在**全局方程**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。
- 3 单击**选择因变量物理量**。
- 4 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “位移”。
- 5 单击**过滤器**。
- 6 在模型树中选择**常规 > 位移 (m)**。
- 7 单击**确定**。
- 8 在**全局方程**的**设置**窗口中，定位到**单位**栏。
- 9 单击**选择源项物理量**。
- 10 在**物理量**对话框中，在文本框中键入 “速度”。
- 11 单击**过滤器**。
- 12 在模型树中选择**常规 > 速度 (m/s)**。
- 13 单击**确定**。
- 14 在**全局方程**的**设置**窗口中，定位到**全局方程**栏。
- 15 在表中输入以下设置：

名称	f(u,ut,utt,t) (m/s)	初始值 (u_0) (m)	描述
u	ut - v	z0	铝板位置

现在定义与铝板的移动一致的网格变形。先使用专用变量对变形区域进行参数化。

16 右键单击**全局方程 2** 并选择**变量**。

定义

变量 2

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 定义**节点下，单击**变量 2**。
- 2 在**变量**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 在**标签**文本框中键入 “z 参数化，顶部”。
- 5 选择 “域” 5 和 10。

6 定位到**变量**栏。在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
s2	$(40[\text{mm}] - Z) / (40[\text{mm}] - 21[\text{mm}])$		

变量 3

- 1 右键单击**组件 1 (comp1) > 定义 > z 参数化**，顶部并选择**变量**。
- 2 在**变量**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “z 参数化，中心”。
- 3 定位到**几何实体选择**栏。从**几何实体层**列表中选择**域**。
- 4 选择 “域” 4 和 9。
- 5 定位到**变量**栏。在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
s2	1		

变量 4

- 1 右键单击**组件 1 (comp1) > 定义 > z 参数化**，中心并选择**变量**。
- 2 在**变量**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “z 参数化，底部”。
- 3 定位到**几何实体选择**栏。从**几何实体层**列表中选择**域**。
- 4 选择 “域” 3 和 8。
- 5 定位到**变量**栏。在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
s2	$(Z - 2.5[\text{mm}]) / (18[\text{mm}] - 2.5[\text{mm}])$		

变量 5

- 1 右键单击**组件 1 (comp1) > 定义 > z 参数化**，底部并选择**变量**。
- 2 在**变量**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “r 参数化，左侧”。
- 3 定位到**几何实体选择**栏。从**几何实体层**列表中选择**域**。
- 4 选择 “域” 3–5。
- 5 定位到**变量**栏。在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
s1	1		

变量 6

- 1 右键单击**组件 1 (comp1) > 定义 > r 参数化**，左侧并选择**变量**。

- 2 在**变量**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “r 参数化，右侧”。
- 3 定位到**几何实体选择**栏。从**几何实体层**列表中选择**域**。
- 4 选择 “域” 8-10。
- 5 定位到**变量**栏。在表中输入以下设置：

名称	表达式	单位	描述
s1	$(110[\text{mm}]-R)/(110[\text{mm}]-65[\text{mm}])$		

动 网 格 (ALE)

现在，仅对要变形的区域应用 “动网格” 接口，并根据定义的变量指定变形。

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**动网格 (ale)**。
- 2 在**动网格**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。
- 3 单击**清除选择**。
- 4 选择 “域” 3-5 和 8-10。
- 5 定位到**坐标系**设置栏。从**几何形函数阶次**列表中选择 **1**。

指定变形 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**域**，然后选择**指定变形**。
- 2 在**指定变形**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。
- 3 从**选择**列表中选择**所有域**。
- 4 定位到**指定网格位移**栏。在 d_z 文本框数组的第 第二 行键入 “(u-18[mm])*s1*s2”。

磁 场 (MF)

为了构建更好的网格，在**磁场**接口中激活**物理场控制网格**。

- 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**物理场控制网格**栏。
- 3 选中**启用复选框**。

网 格 1

- 1 在**模型开发器**窗口中展开**组件 1 (comp1)> 网格 1** 节点。
- 2 右键单击**组件 1 (comp1)> 磁场 (mf)** 并选择**全部构建**。

研究 1

步骤 1：瞬态

- 1 在**模型开发器**窗口的**研究 1** 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(0,0.01,1.7)”。
 - 4 从容差列表中选择用户控制。
 - 5 在相对容差文本框中键入 “0.001”。
- 最后，为铝板位移变量和洛伦兹力添加探针。
- 6 在定义工具栏中单击探针，然后选择全局变量探针。

定义

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1)> 定义节点下，单击全局变量探针 1 (var1)。
- 2 在全局变量探针的设置窗口中，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 (comp1)> 铝板动力学 > u - 铝板位置 - m。
- 3 定位到表达式栏。选中描述复选框。
- 4 在关联文本框中键入 “铝板位移”。

全局变量探针 2 (var2)

- 1 在定义工具栏中单击探针，然后选择全局变量探针。
- 2 在全局变量探针的设置窗口中，定位到表达式栏。
- 3 在表达式文本框中键入 “mf.Forcez_0”。
- 4 选中描述复选框。
- 5 在关联文本框中键入 “电磁力 z 分量”。
- 6 单击以展开表格和窗口设置栏。从输出表列表中选择新表格。
- 7 从绘图窗口列表中选择新窗口。

研究 1

设置求解时显示结果功能，跟踪求解过程中铝板的移动和网格变形。

在研究工具栏中单击显示默认求解器。

结果

在模型开发器窗口中展开结果节点。

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 选择“域”3-5 和 8-10。

二维绘图组 1

- 1 在主屏幕工具栏中单击**添加绘图组**，然后选择**二维绘图组**。
- 2 在**二维绘图组的设置**窗口中，定位到**绘图设置**栏。
- 3 从**坐标系**列表中选择**空间 (r, phi, z)**。

网格 1

- 1 右键单击**二维绘图组 1** 并选择**网格**。
- 2 在**网格的设置**窗口中，定位到**颜色**栏。
- 3 从**单元颜色**列表中选择**无**。
- 4 从**线框颜色**列表中选择**白色**。

表面 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，右键单击**二维绘图组 1** 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 (comp1) > 动网格 > 指定网格位移 (空间坐标系) - m > ale.dxz - 指定网格位移, z 分量**。

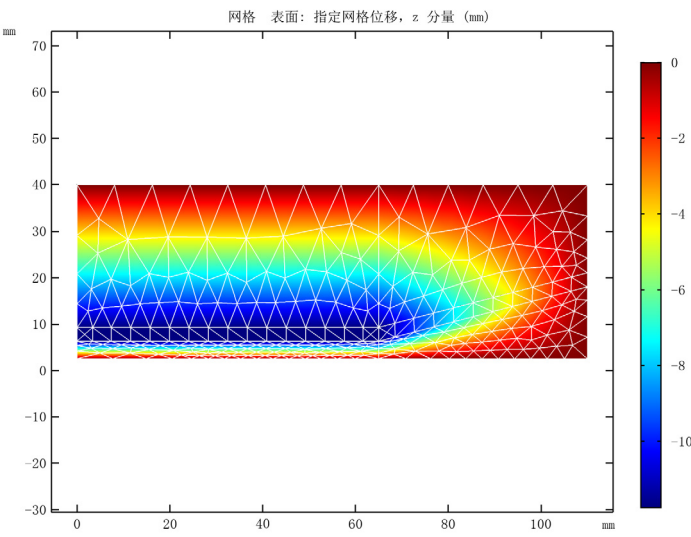
研究 1

步骤 1: 瞬态

- 1 在**模型开发器**窗口的**研究 1** 节点下，单击**步骤 1: 瞬态**。
- 2 在**瞬态的设置**窗口中，单击以展开**求解时显示结果**栏。
- 3 选中**绘制复选框**。
- 4 在主屏幕工具栏中单击**计算**（注意，在求解过程中，**图形**窗口和**探针图**窗口显示计算过程中系统的演变。）

结果

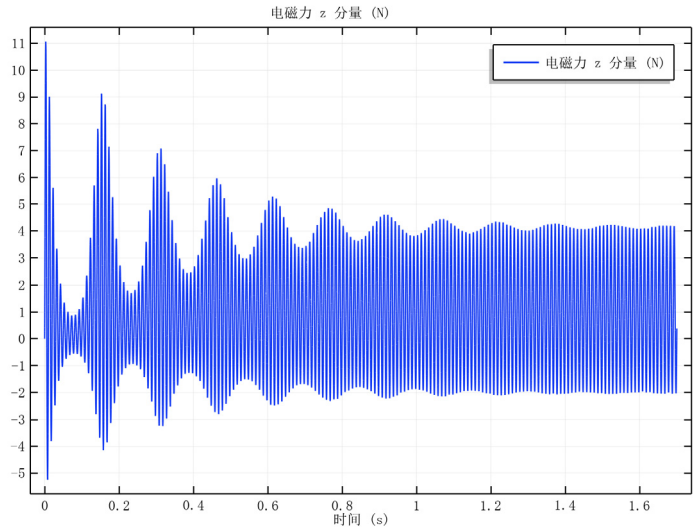
二维绘图组 1



探针图组 3

- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，单击探针图组 3。
- 2 在一维绘图组的设置窗口中，在标签文本框中键入 “电磁力 z 分量”。
- 3 单击以展开标题栏。从标题类型列表中选择手动。
- 4 在标题文本区中键入 “电磁力 z 分量 (N)”。
- 5 定位到绘图设置栏。选中 y 轴标签复选框。
- 6 清除 y 轴标签文本框。

7 在电磁力 z 分量工具栏中单击绘制。



创建一个新的数据集和一个磁通密度二维绘图。

选择

- 1 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 1 (sol1) 并选择生成副本。
- 2 在模型开发器窗口中展开研究 1/解 1 (3) (sol1) 节点，然后单击选择。
- 3 选择“域”2-5、7-10 和 12（所有不属于无限元区域的域）。

二维绘图组 4

- 1 在主屏幕工具栏中单击添加绘图组，然后选择二维绘图组。
- 2 在二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 1/解 1 (3) (sol1)。

表面 1

- 1 右键单击二维绘图组 4 并选择表面。

保留要绘制的默认物理量（磁通密度模）。

绘制磁通密度场的线。在二维轴对称模式中，这些线相当于矢量磁势的等值线乘以半径。使用等值线图将这个物理量可视化，因为等值线图通常能够呈现更美观的绘图。

等值线 1

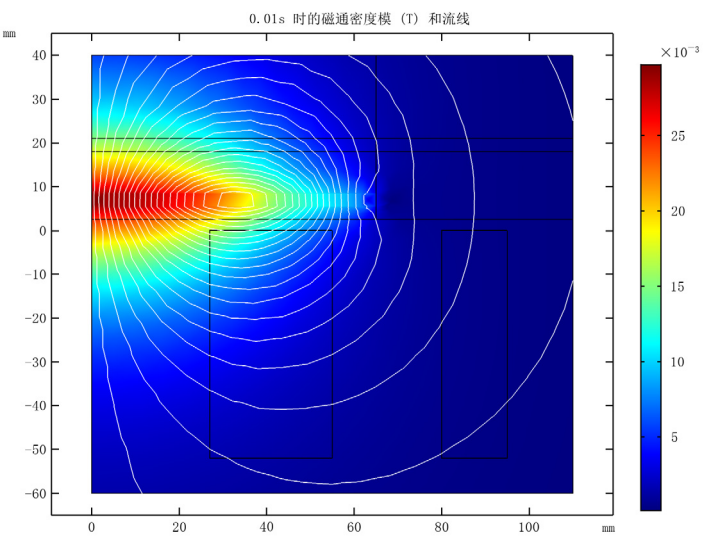
- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，右键单击二维绘图组 4 并选择等值线。

- 2 在等值线的设置窗口中，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 > 磁 > 矢量磁势（空间坐标系）- Wb/m > mf.Aphi - 矢量磁势， phi 分量。
- 3 将表达式修改为 mf.Aphi*r。
- 4 定位到着色和样式栏。从着色列表中选择均匀。
- 5 从颜色列表中选择白色。
- 6 清除颜色图例复选框。

二维绘图组 4

- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，单击二维绘图组 4。
- 2 在二维绘图组的设置窗口中，在标签文本框中键入 “磁通密度”。
- 3 定位到数据栏。从时间 (s) 列表中选择 0.01。
- 4 单击以展开标题栏。从标题类型列表中选择手动。
- 5 在标题文本区中键入 “0.01s 时的磁通密度模 (T) 和流线”。
- 6 在磁通密度工具栏中单击绘制。

接下来，导入实验数据，与计算得出的解进行比较。



表格 3

- 1 在结果工具栏中单击表格。
- 2 在表格的设置窗口中，在标签文本框中键入 “实验数据”。
- 3 定位到数据栏。单击导入。

- 4 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 `electrodynamic_levitation_device_data.txt`。

探针图组 2

- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，单击探针图组 2。
- 2 在一维绘图组的设置窗口中，在标签文本框中键入“铝板动力学比较”。
- 3 定位到标题栏。从标题类型列表中选择手动。
- 4 在标题文本区中键入“铝板轴向位移 (mm)”。
- 5 定位到绘图设置栏。选中 x 轴标签复选框。

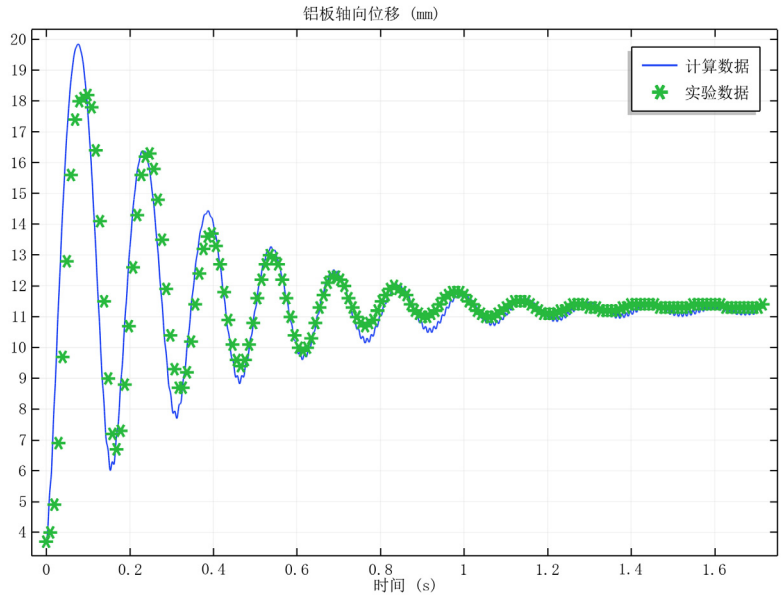
探针表图 1

- 1 在模型开发器窗口中展开结果 > 铝板动力学比较节点，然后单击探针表图 1。
- 2 在表图的设置窗口中，单击以展开图例栏。
- 3 从图例列表中选择手动。
- 4 在表格的第一行中键入计算数据。

表图 2

- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，右键单击铝板动力学比较并选择表图。
- 2 在表图的设置窗口中，定位到数据栏。
- 3 从表格列表中选择实验数据。
- 4 定位到着色和样式栏。找到线标记子栏。从标记列表中选择循环。
- 5 从定位列表中选择数据点中。
- 6 找到线样式子栏。从线列表中选择无。
- 7 定位到图例栏。选中显示图例复选框。
- 8 从图例列表中选择手动。
- 9 在表格的第一行中键入实验数据。

10 在**铝板动力学比较**工具栏中单击**绘制**。



研究 1/ 解 1 (3) (sol1)

使用数据集“旋转”将完整的三维几何可视化。

选择

- 1 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 1 (3) (sol1)**并选择**生成副本**。
- 2 在**模型开发器**窗口中展开**研究 1/ 解 1 (4) (sol1)**节点，然后单击**选择**。
- 3 选择“域”4、7和12（两个线圈和铝板）。

二维旋转 1

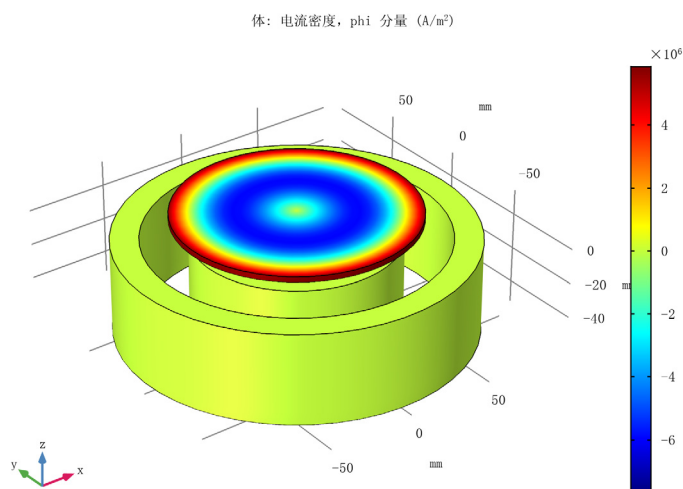
- 1 在**结果**工具栏中单击**更多数据集**，然后选择**二维旋转**。
- 2 在**二维旋转**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。
- 3 从**数据集**列表中选择**研究 1/ 解 1 (4) (sol1)**。
- 4 单击以展开**旋转层**栏。在**起始角度**文本框中键入“-90”。
- 5 在**旋转角度**文本框中键入“240”。
- 6 在**起始角度**文本框中键入“0”。
- 7 在**旋转角度**文本框中键入“360”。
- 8 在**结果**工具栏中单击**三维绘图组**。

体 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 5 并选择体。
- 2 在体的设置窗口中，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 > 电流密度（空间坐标系） - A/m^2 > $mf.Jphi$ - 电流密度， phi 分量。

三维绘图组 5

- 1 在模型开发器窗口的结果节点下，单击三维绘图组 5。
- 2 在三维绘图组的设置窗口中，在标签文本框中键入 “电流密度”。
- 3 定位到绘图设置栏。从坐标列表中选择空间 (r, phi, z) 。
- 4 在电流密度工具栏中单击绘制。



导出

最后，创建铝板移动的动画。

动画 1

- 1 在结果工具栏中单击动画，然后选择播放器。
- 2 在动画的设置窗口中，定位到场景栏。
- 3 从主题列表中选择电流密度。
- 4 定位到动画编辑栏。从时间选择列表中选择来自列表。
- 5 从时间步 (s) 列表中，选择 1.2 之前的所有时间步。
- 6 定位到帧栏。在帧数文本框中键入 “50”。
- 7 在图形工具栏中，单击播放。

