

## 实验七 涡流效应的仿真研究

### 一、实验目的

- (1) 学习使用ANSYS Maxwell 2D/3D软件求解具有一定厚度的金属盘在磁场中的涡流。
- (2) 研究稳恒磁悬浮现象，分析铝盘受力大小与悬浮高度的关系。

### 二、原理与说明

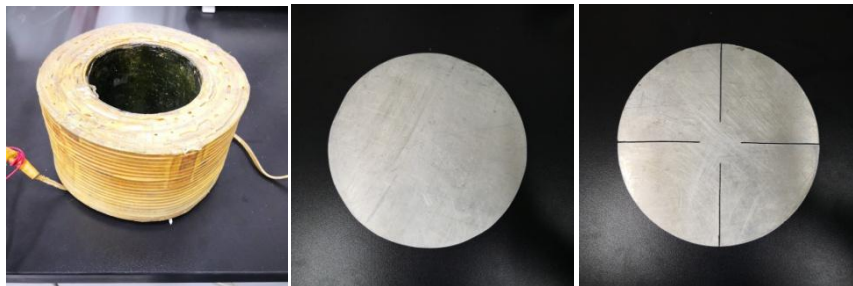
由于电磁感应，当具有一定厚度的金属处在变化的磁场中，或相对于磁场运动时，金属体内会感生出呈漩涡状流动的电流，简称涡流。

在通入交变电流的螺线管上方放置具有一定厚度的圆形金属盘，金属盘中就会产生涡流。此涡流的大小可通过ANSYS Maxwell 2D/3D软件中的电流密度 $J$ 来展现。

当通电螺线管线圈上方放置的是铝盘时，铝盘受到线圈对它向上的作用力，当该作用力大于铝盘的重力时，铝盘会向上浮动。当线圈对铝盘的作用力与铝盘的重力在空中某一位置处达到动态平衡，铝盘将悬浮在此处。铝盘受力大小可通过在ANSYS Maxwell 2D/3D软件中添加力(Force)来实现。铝盘距离线圈的不同位置可通过添加参数分析实现。

### 三、实验任务

一螺线管线圈，高为 100mm，内径 50mm，外径 180mm，匝数为 330 匝，每匝线圈的电流为 40A，在螺旋管线圈上方 3mm 处放置一块厚度为 3mm、直径为 180mm 的圆形铝盘、铁盘或铜盘。



(a) 螺线管线圈 (b) 铝盘 (c) 开槽铝盘

图3.2.5-1螺线管线圈及铝盘、开槽铝盘

- (1) 在ANSYS Maxwell 2D中，根据给定尺寸建立螺线管线圈上方放置一铝盘的模型，计算铝盘轴对称截面的涡电流密度及铝盘的受力情况。
- (2) 采用参数扫描分析铝盘距离螺线管不同高度时的受力情况，并确定铝盘脱离线圈产生稳恒磁悬浮的高度。
- (3) 将任务(1)中的铝盘换成大小相同的铁盘，计算铁盘轴对称截面的涡电流密度。
- (4) 在ANSYS Maxwell 3D中建立铝盘和螺线管的模型，计算铝盘的受力情况。
- (4) 将铝盘开4槽，计算铝盘的涡电流密度及受力情况，分析此时铝盘能否脱离线圈上浮。

### 四、仿真提示

#### 1. Maxwell 2D模型仿真

铝盘与螺线管线圈的仿真模型如图3.2.5-2所示。

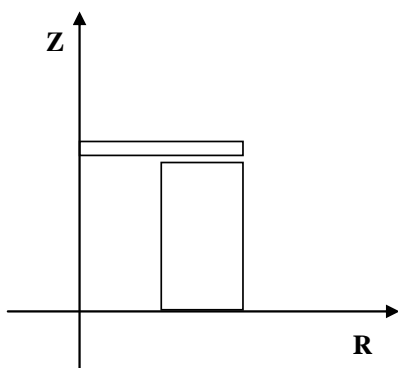


图 3.2.5-2 铝盘与螺线管线圈仿真模型

### (1) 创建Maxwell 2D设计文件

步骤 1: 打开软件。双击 ANSYS Electronics Desktop 图标，打开软件同时打开一个新的工程 Project1.aedt。

步骤 2: 嵌入新 Maxwell2D 设计文件。菜单栏选择 Project→Insert Maxwell 2D Design，即在工程 Project1 中插入一个 Maxwell2DDesign1 设计文件，菜单栏选择 File→Save，弹出另存为对话框，将工程保存至桌面。

步骤 3: 指定求解类型。菜单栏选择 Maxwell 2D→Solution Type，打开 Solution Type 窗口，选择圆柱坐标系 Cylindrical about Z，涡流场 Eddy Current 求解器，单击 OK。

步骤 4: 置绘图单位，菜单栏选择 Modeler→Units，打开 Set Model Units 窗口，选择单位 mm，单击 OK。

### (2) 建立几何模型

步骤 1: 菜单栏选择 Draw→Rectangle，绘制线圈模型。

步骤 2: 修改线圈模型的属性，在工程树栏，双击 Rectangle1，打开模型属性窗口，设置矩形的 Name 属性为 coil；矩形的 Color 属性改为黄色；单击 OK，单击确定。

步骤 3: 菜单栏选择 Draw→Rectangle，绘制铝盘模型。

步骤 4: 修改铝盘模型的属性，在工程树栏，双击 Rectangle2，打开模型属性窗口设置，矩形 Name 属性为 plate；矩形的 Color 属性改为灰色，单击 OK，单击确定。

步骤 5: 菜单栏选择 Draw→Rectangle，绘制求解域。一个对角点  $(X, Y, Z) = (0, 0, -300)$ ，另一个对角点  $(dX, dY, dZ) = (300, 0, 600)$ 。

步骤 6: 修改求解域的属性，在工程树栏，双击 Rectangle3，打开模型属性窗口设置，矩形 Name 属性为 Region，透明度 Transparent 属性的值修改为 1，单击 OK，单击确定。

步骤 7: 菜单栏选择 View→FitAll→All Views，可使整个模型显示在屏幕内。

### (3) 添加材料

步骤 1: 设置线圈的材料为铝 aluminum。

步骤 2: 设置铝盘的材料为铝 aluminum。

步骤 3: 设置求解域 Region 的材料为空气 air。

### (4) 添加激励、边界条件和网格剖分

步骤 1: 给线圈添加激励, 在工程树栏单击线圈模型 coil, 将其选中, 在菜单栏选择 Maxwell 2D→Excitations→Assign→Current, 打开 Current Excitation 窗口, 设置线圈截面通过的电流为 A, Type 为 Stranded, Ref. Direction 为 Positive, 选中 Positive 表明电流方向穿入屏幕, 单击 OK。

注意: 电流激励的类型选择“solid”表明会考虑线圈中的涡流。反过来, 如果选择“stranded”表面仅计算线圈的直流电阻, 不考虑线圈中的交流效应。参考方向 Ref. Direction 为 Positive 表明电流方向穿入屏幕, 为 Negative 表明电流方向穿出屏幕。

步骤 2: 给求解域 Region 添加边界条件。在菜单栏选择 Edit→Select→Edges, 按下 Ctrl 按键, 用鼠标在模型上依次单击 Region 的上、下和右边界, 菜单栏选择 Maxwell 2D → Boundaries → Balloon, 打开 Balloon Boundary 窗口, 单击 OK; 在菜单栏选择 Edit → Select → Edges, 用鼠标单击 Region 的左边界, 菜单栏选择 Maxwell 2D → Boundaries → Symmetry → Odd, 单击 OK。

注意: 1. Balloon 气球边界将求解域外的绘图空间模拟为“无限”大—有效地将模型与其他电流或磁场源隔离, 用于模拟绝缘系统。2. 对称边界条件 Symmetry 分为奇对称边界(odd)和偶对称边界条件 (Even)。

步骤 3: 给铝盘加载涡流影响的计算。在工程树栏单击 plate, 将其选中, 菜单栏选择 Maxwell 2D → Excitations → Set Eddy Effect, 打开 Set Eddy Effect 对话框, 勾选铝盘 plate 上的 Eddy Effect 复选框, 取消线圈 coil 的复选框勾选, 如图 3.2.5-3 所示, 单击确定。

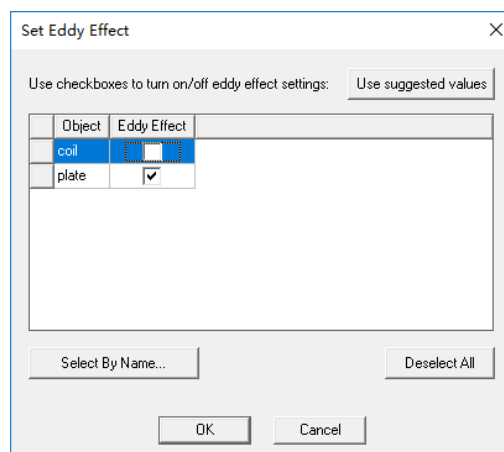


图 3.2.5-3 给铝盘添加涡流影响的计算

步骤 4: 设置网格剖分, 由于模型比较简单, 直接采用默认网格剖分, 不进行设置。

#### (5) 添加求解力的参数

步骤 1: 给铝盘添加求解力的参数, 在工程树栏单击铝盘模型 plate, 将其选中。在菜单栏选择 Maxwell 2D→Parameter→Assign→Force, 打开 Force 窗口, 单击确定。

#### (6) 求解计算

步骤 1: 添加求解选项, 在菜单栏选择 Maxwell 2D→Analysis Setup→Add Solution Setup, 打开求解设定对话框, 如图 3.2.5-4 所示, General 选项卡保持默认设置, 单击 solver 选项卡设置 Adaptive Frequency 为 50Hz, 单击确定。

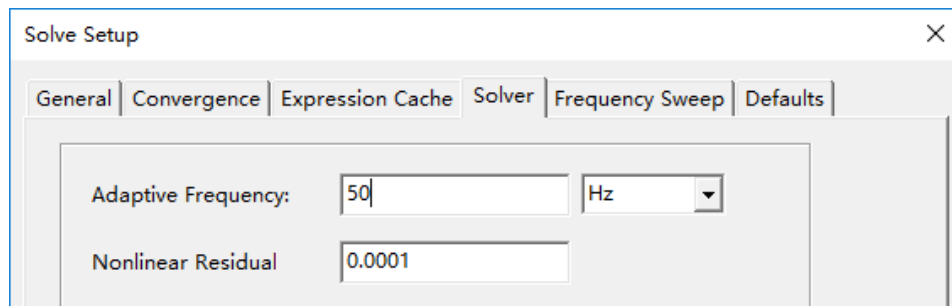


图 3.2.5-4 设置求解选项窗口

步骤 2: 检测模型, 菜单栏选择 Maxwell 2D→Validation Check, 系统会自动检测模型, 检测模型无错误, 单击 Close 关闭检测。

步骤 3: 启动分析, 在工程管理栏的 Analysis 部分中右键单击 Setup1, 选择 Analyze 启动分析, 或在菜单栏选择 Maxwell 2D→AnalyzeAll 启动分析。

步骤 4: 查看收敛情况。在工程管理栏的 Analysis 部分中右键单击 Setup1, 选择 Convergence 查看收敛情况, 如图 3.2.5-5 所示, 可以看到经过四次自适应求解, Energy Error 和 Delta Energy 均小于设定的 1%, 达到要求。

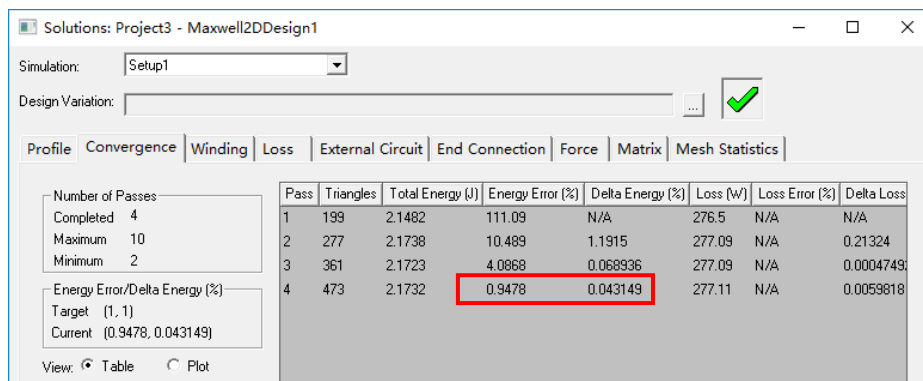


图 3.2.5-5 查看收敛信息

## (7) 后处理

步骤 1：查看铝盘受到的力。在菜单栏选择 Maxwell 2D→Results→Solution Data，打开如 3.2.5-6 所示 Solutions 窗口，在 Force 选项卡中查看铝盘受到的力。铝盘是否能悬浮？

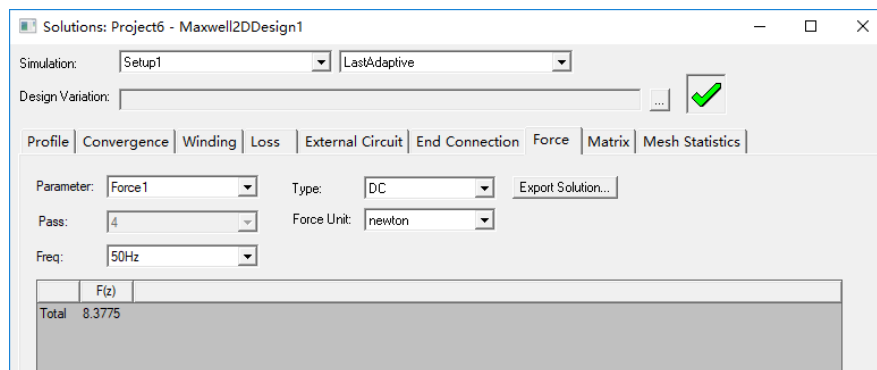


图 3.2.5-6 Solutions 窗口

步骤 2：查看铝盘轴对称截面上的涡电流密度。选中铝盘，菜单栏选择 Maxwell 2D→Fields→JAtPhase，则铝盘上的涡电流密度分布如图 3.2.5-7 所示。

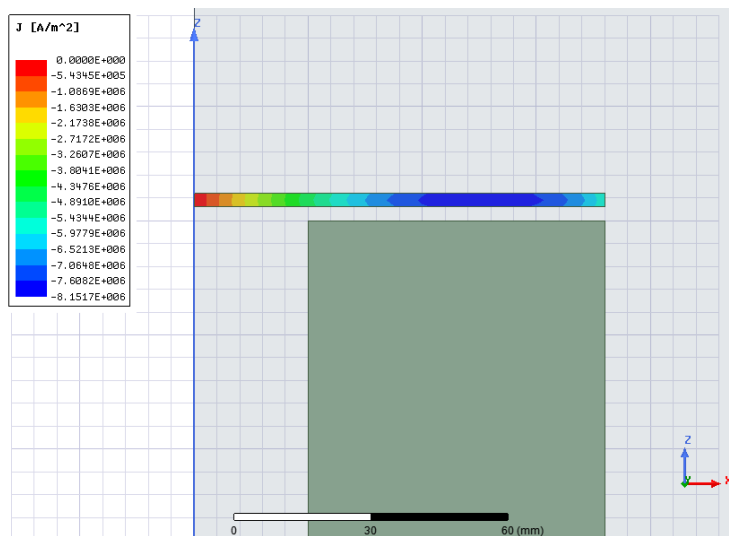


图 3.2.5-7 铝盘上的涡电流密度分布

步骤 3：在工程树栏将铝盘的材料改为铁，重新求解计算，查看铁盘受到的力。铁盘是否能悬浮？

## (8) 参数分析（分析铝盘不同位置时的受力情况）

步骤 1：添加变量。在工程树栏单击铝盘 plate，将其选中，在菜单栏选择 Edit→Arrange→Move，在状态栏坐标输入框中输入矢量起点坐标 (X, Y, Z)=(0, 0, 100)，增量坐标 (X, Y, Z)=(0, 0, 50)，单击 Enter 键确定。

步骤 2：在工程树栏双击铝盘 plate 部分下方的 Move，如图 3.2.5-8 (a) 所示，打开如

图 3.2.5-8（b）所示 Properties 窗口，将 MoveVector 栏的坐标 50 改为 var，单击 Enter 键，弹出 AddVariable 窗口，UnitType 选择 length，Unit 选择 mm，单击 OK 关闭 AddVariable 窗口，单击确定关闭 Properties 窗口。

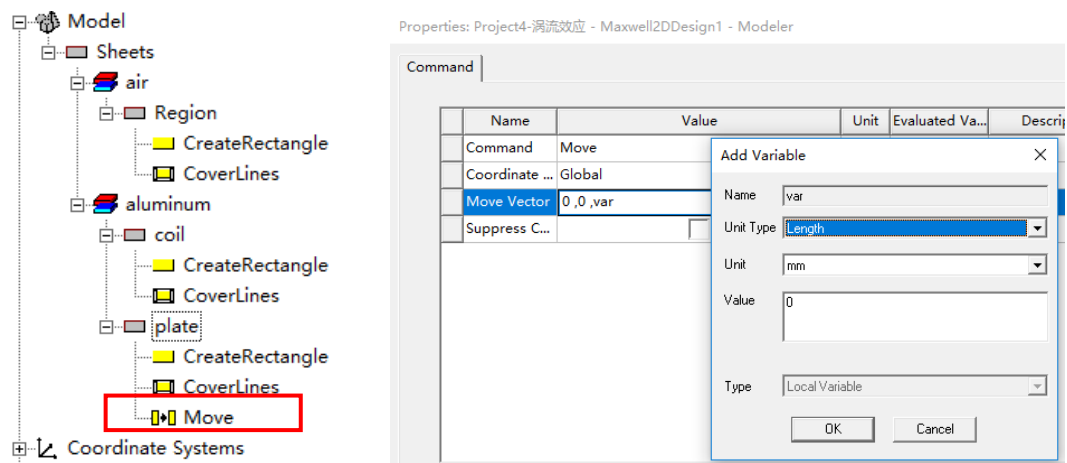
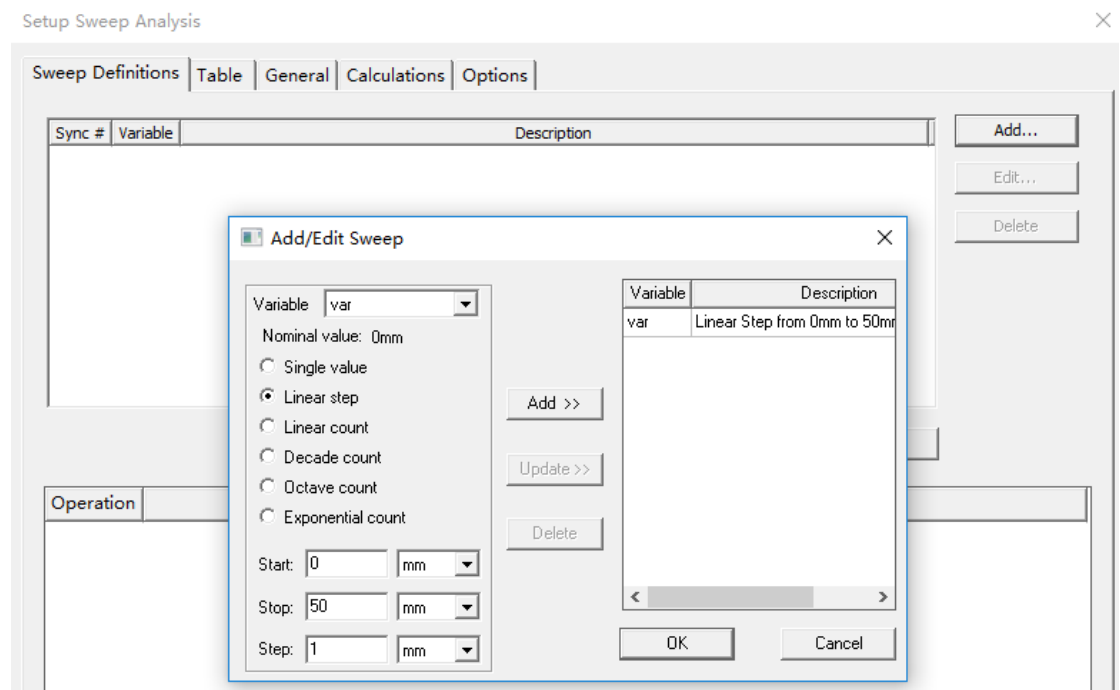


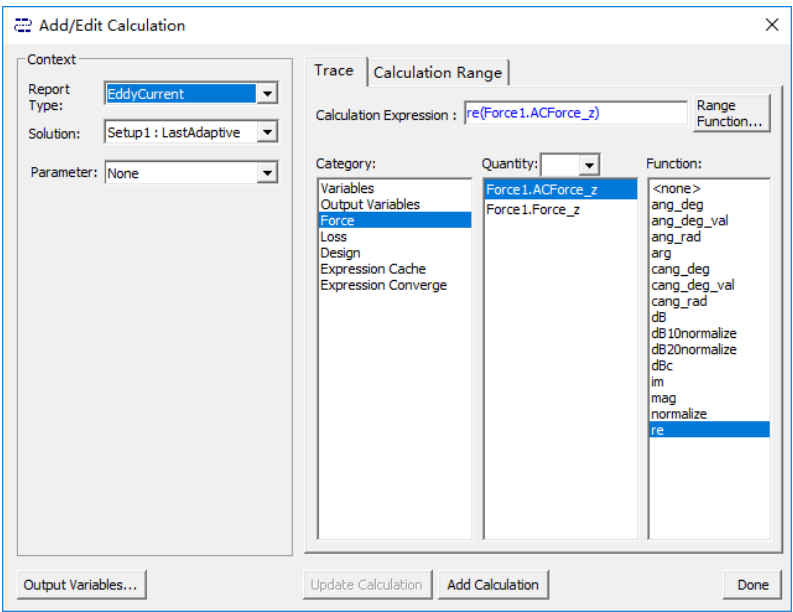
图3.2.5-8添加变量

步骤 3：设置参数分析变量的范围。在菜单栏选择 Maxwell 2D→Optimetrics Analysis → Add parametric，打开如图 3.2.5-9 所示 Setup Sweep Analysis 对话框，单击 Add，弹出 Add/Edit Sweep 对话框，Variable 选择已定义的变量 var，扫描类型选择 Linear Step，Start 为 100mm，Stop 为 150mm，Step 为 1mm，单击 Add，单击 OK 关闭 Add/Edit Sweep 对话框。



步骤 4：设置每一步参数分析都求解力参数。在图 3.2.5-9 所示 Setup Sweep Analysis 对话框，单击 Calculations 选项卡，在 Calculations 选项卡中单击 Setup Calculations 按钮，打开

如图 3.2.5-10 所示 Add/Edit Calculations 窗口，单击 Add Calculation 按钮，单击 Done 关闭 Add/Edit Calculations 窗口。单击确定关闭 Setup Sweep Analysis 窗口。



3.2.5-10 Add/Edit Calculation窗口

步骤5: 启动分析，在工程管理栏的Optimetrics部分中右键单击ParametricSetup1，选择Analyze启动参数分析。

步骤6: 查看参数分析结果。在工程管理栏的Optimetrics部分中右键单击ParametricSetup1，选择View Analysis Results，打开如图3.2.5-11所示Post Analysis Display对话框，X轴为distance，Y轴为铝盘收到的力Force，单击Table或Plot单选按钮可以切换显示结果为曲线或表格。

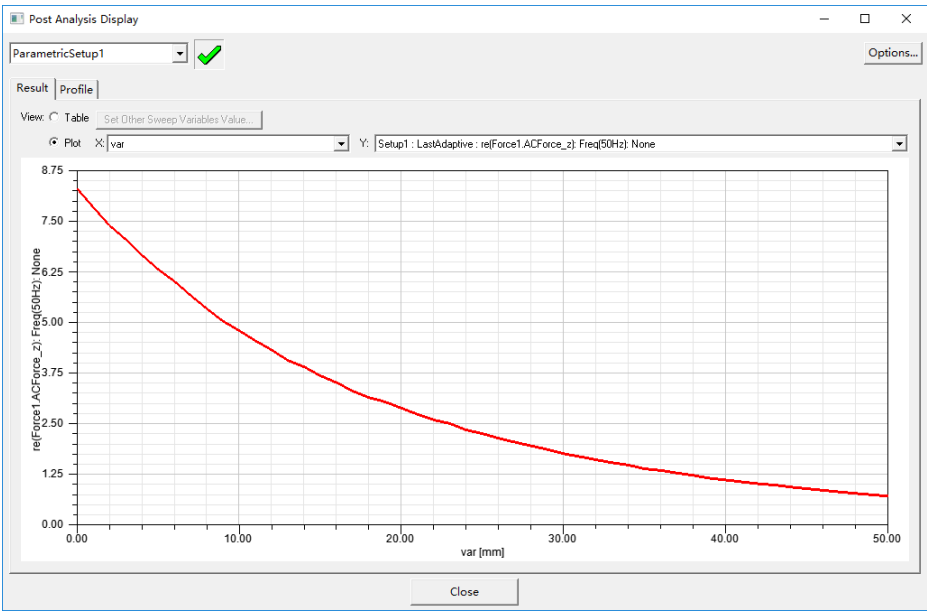


图3.2.5-11PostAnalysisDisplay窗口

## 2. Maxwell 3D模型仿真

### (1) 创建Maxwell 3D设计文件

步骤 1: 打开软件。双击 ANSYS Electronics Desktop 图标, 打开软件同时打开一个新的工程 Project1.aedt。

步骤 2: 嵌入新 Maxwell3D 设计文件。菜单栏选择 Project→Insert Maxwell 3D Design, 即在工程 Project1 中插入一个 Maxwell3DDesign1 设计文件, 菜单栏选择 File→Save, 弹出另存为对话框, 将工程保存至桌面。

步骤 3: 指定求解类型。菜单栏选择 Maxwell 3D→Solution Type, 打开 Solution Type 窗口, 选择涡流场 Eddy Current 求解器, 单击 OK。

步骤 4: 置绘图单位, 菜单栏选择 Modeler→Units, 打开 Set Model Units 窗口, 选择单位 mm, 单击 OK。

### (2) 建立几何模型

步骤 1: 设置 YOZ 平面为绘图屏幕, 菜单栏选择 Modeler→Grid Plane→YZ。

步骤 2: 绘制线圈, 菜单栏选择 Draw → Rectangle, 绘制线圈的矩形截面模型。

步骤 3: 在工程树栏单击 Rectangle1, 将其选中, 菜单栏选择 Draw → Sweep, 打开 Sweep Around Axis 窗口, Sweep Axis 为 Z 轴, Angle of sweep 为  $360^{\circ}$ , 单击确定关闭窗口。

步骤 4: 修改线圈模型的属性, 在工程树栏, 双击 Rectangle1, 打开模型属性窗口设置, 矩形 Name 属性为 coil; 矩形的 Color 属性改为黄色; 单击 OK, 单击确定。

步骤 5: 绘制铝盘, 菜单栏选择 Draw→Rectangle, 绘制铝盘的矩形截面模型。

步骤 6: 在工程树栏单击铝盘截面 Rectangle1, 将其选中, 菜单栏选择 Draw→Sweep, 打开 Sweep Around Axis 窗口, Sweep Axis 为 Z 轴, Angle of sweep 为  $360^{\circ}$ , 单击确定关闭窗口。

步骤 5: 设置 XOY 平面设置为绘图屏幕, 菜单栏选择 Modeler→Grid Plane→XY。

步骤 6: 绘制求解域, 绘制一个圆柱作为求解域。菜单栏选择 Draw→Cylinder, 在状态栏的坐标输入框中输入圆柱底面圆心坐标, 再输入半径和高(注意应与 2D 求解域的大小相等)。

步骤 7: 修改求解域的属性, 在工程树栏, 双击 Rectangle1, 打开模型属性窗口, 设置矩形 Name 的属性为 Region, 透明度 Transparent 属性的值修改为 1, 单击 OK, 单击确定。

步骤 8: 菜单栏选择 View→Fit All→All Views, 可使整个模型显示在屏幕内。



### （3）添加材料

步骤 1：设置线圈的材料为铝 aluminum。

步骤 2：设置铝盘的材料为铝 aluminum。

步骤 3：设置求解域 Region 的材料为空气 air。

### （4）添加激励、边界条件和网格剖分

步骤 1：给线圈添加截面。在工程树栏单击 coil 将其选中，在工程树栏单击线圈模型 coil，将其选中，在菜单栏选择 Modeler → Surface → Section → YZ，单击 OK。

步骤 2：将两个截面分离。在截面选中情况下（可在工程树栏单击 Coil\_Section1 选中），在菜单栏选择 Modeler → Boolean → Separate Bodies，将步骤 1 截取的两个界面分离为 2 个单独的面。

步骤 3：添加激励。在工程树栏单击截面 Coil\_Section1，将其选中，在菜单栏选择 Maxwell 2D→Excitations→Assign→Current，打开 Current Excitation 窗口，设置截面通过的总电流为 A，Type 为 Stranded，Ref. Direction 为 Positive，选中 Positive 表明电流方向穿入屏幕，单击 OK。

步骤 3：给铝盘加载涡流影响的计算。在工程树栏单击 plate，将其选中，菜单栏选择 Maxwell 3D→Excitations→Set Eddy Effect，打开 Set Eddy Effect 对话框，勾选铝盘 plate 上的 Eddy Effect 复选框，取消线圈 coil 上的 EddyEffect 复选框勾选，单击确定。

步骤 4：设置网格剖分，由于模型比较简单，直接采用默认网格剖分，不进行设置。

### （5）添加求解力的参数

步骤 1：给铝盘添加求解力的参数，在工程树栏单击铝盘模型 plate，将其选中。在菜单栏选择 Maxwell 3D→Parameter→Assign→Force，打开 Force 窗口，Type 选择 Lorentz，单击确定。

### （6）求解计算

步骤 1：添加求解选项，在菜单栏选择 Maxwell 3D→Analysis Setup→Add Solution Setup，打开求解设定对话框，General 选项卡保持默认设置，单击 solver 选项卡设置 Adaptive Frequency 为 50Hz，单击确定。

步骤 2：检测模型，菜单栏选择 Maxwell 3D→Validation Check，系统会自动检测模型，检测模型无错误，单击 Close 关闭检测。

步骤 3：启动分析，在工程管理栏的 Analysis 部分中右键单击 Setup1，选择 Analyze 启动分析。

步骤 4：查看收敛情况。在工程管理栏的 Analysis 部分中右键单击 Setup1，选择 Convergence 查看收敛情况，查看能量误差，是小于设定的 1%。

### (7) 后处理

步骤 1：查看铝盘受到的力。在菜单栏选择 Maxwell 3D→Results→Solution Data，在 Force 选项卡中查看铝盘受到的力，如图 3.2.5-12 所示。铝盘是否能悬浮？

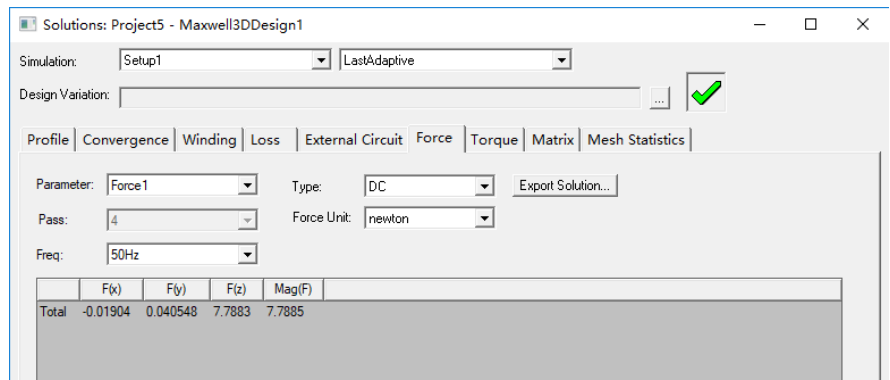


图3.2.5-12Solutions对话框

步骤 2：查看铝盘轴对称截面上的涡电流密度图。菜单栏选择 Maxwell 3D→Fields→J→Vector\_J，结果如图 3.2.5-13 所示。

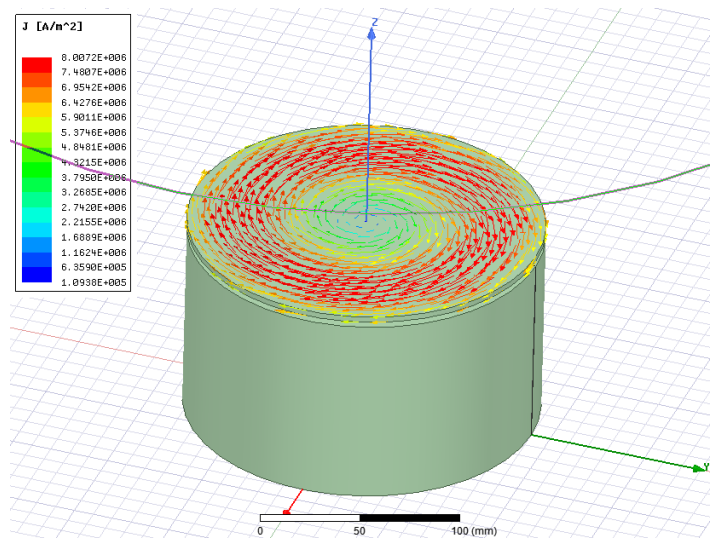


图 3.2.5-13 铝盘上的涡电流密度图

### (8) 给铝盘开槽

模拟实际开槽铝盘建模。

步骤 1：在铝盘上绘制一个 Box（Draw→Box）。

步骤 3：沿轴向将 Box 复制 4 个（Edit→Duplicate→AroundAxis）。

步骤 3：用铝盘将 4 个 Box 减去，得到开槽铝盘模型（Modeler→Boolean→Substract）。